El tiempo de los valientes, de las ideas a la innovación

Una hoja de ruta para la transformación tecnológica de España

Coordinador **Javier García Martínez**

FUNDACIÓN RAFAEL DEL PINO
CÁTEDRA CIENCIA Y SOCIEDAD

Índice

Entrevistas
Pag. 10

00.
Pasar a la acción en la hora de los valientes
Pag. 20

01.
IA en español
Pag. 36

02.
Una agricultura para el agua
Pag. 68

03.
El resurgir de los fagos
Pag. 102

04.
Técnicas CRISPR
Pag. 132

05.
Hacia una aviación sostenible
Pag. 164

06.
La era de los biocombustibles
Pag. 196

07.
Lanzaderas espaciales
Pag. 224

08.
Bajo la cúpula de las mega-constelaciones
Pag. 254

09.
El despertar del metanol 'verde'
Pag. 288

10.
Educar con inteligencia artificial
Pag. 320

Javier García Martínez

En la Cátedra de Ciencia y Sociedad de la Fundación Rafael del Pino, llevamos cinco años dando voz a los expertos. Con su conocimiento y experiencia, hemos creado este libro que es en realidad una guía para transitar hacia un sistema productivo más competitivo y diversificado, basado en el conocimiento. Se trata de un análisis riguroso en el que presentamos diez tecnologías que, según destacados científicos y tecnólogos de nuestro país, representan oportunidades excepcionales para mejorar la competitividad de nuestro sistema productivo, generar empleo de calidad y fortalecer nuestra economía en general. No son necesariamente las tecnologías más llamativas, ni los mayores descubrimientos del año, sino parte de la solución a algunos de los grandes desafíos a los que se enfrenta España. En este libro descubrirás ideas innovadoras y una hoja de ruta que incluye tecnologías que nos permitirán adaptar la agricultura a nuestra realidad hídrica; la aviación sostenible, esencial en un mundo que sufre las consecuencias del cambio climático; y los nuevos biocombustibles, que representan una alternativa energética más sostenible. Otras tecnologías, como CRISPR y el uso de los fagos para la lucha contra la enfermedad, marcan avances significativos en salud. Asimismo, exploramos cómo educar mejor con inteligencia artificial y cómo hacer posible una IA que piense en español. También, el transporte espacial, las megaconstelaciones de satélites, y la producción y utilización del metanol 'verde', por los que España está apostando decididamente, son algunas de las claves para diversificar y mejorar la competitividad de nuestra economía.

Quiero dejar claro que estas tecnologías no son descubrimientos científicos en busca de un problema que resolver. Al contrario, son oportunidades para enfrentar algunos de los desafíos que tiene por delante España que, si bien es actualmente la cuarta economía más grande de la Unión Europea, enfrenta importantes retos en un contexto internacional incierto. Aunque nuestro país ha mostrado un notable crecimiento económico en 2023, impulsado por la recuperación tras la pandemia, persisten desafíos significativos. La alta tasa de desempleo, especialmente entre los jóvenes, sigue siendo un problema estructural que limita el potencial económico del país. Además, la urgente modernización de sectores clave, como la industria y los servicios, es vital para mejorar nuestra competitividad. Es hora de pasar del análisis a la implementación de medidas que promuevan el uso de tecnologías emergentes, ya que estas impulsan la productividad y mejoran la eficiencia de las empresas, lo que resulta en una economía más resiliente y que respon-

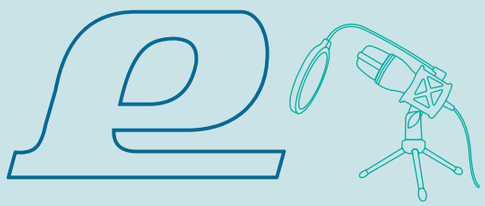
de mejor a los cambios del mercado global, lo que es esencial en un entorno cada vez más competitivo y dinámico.

Con estas ideas en mente, hemos trabajado durante todo un año para producir un libro atractivo y riguroso, escrito en un lenguaje accesible. Esta obra está dividida en diez capítulos que siguen un mismo esquema en tres partes: en la primera se presenta y explica la tecnología a la que está dedicado el capítulo, en la segunda se describe la oportunidad que representa desde el punto de vista económico y social y finalmente se analiza su encaje en el tejido productivo español, incluyendo ejemplos de las empresas que están liderando el desarrollo y la implementación de las innovaciones que describimos. Al explorar este informe, encontrarás numerosas ilustraciones e infografías que han sido elaboradas para explicar cada tecnología y cómo puede contribuir a mejorar la competitividad de la economía española. Además, incluye figuras, tablas y gráficos que ayudan a entender otros aspectos importantes tales como la posición de nuestro país en el contexto internacional para una tecnología en particular o los sectores en los que estas innovaciones tienen mayor capacidad transformadora. Por primera vez, incorporamos una serie de entrevistas a expertos, lo que permite profundizar en aspectos esenciales y complementarios a los tratados en los capítulos.

No se me ocurre una lectura más pertinente y actual que la que ofrece este libro. Por ello, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a cada uno de los miembros del comité de expertos de la Cátedra de Ciencia y Sociedad de la Fundación Rafael del Pino. Sin su valioso conocimiento técnico y su amplia experiencia profesional, nada de lo que contiene esta obra habría sido posible. Gracias a su compromiso y generosidad, hemos podido identificar oportunidades emergentes y explicarlas de manera rigurosa y accesible. Desde una perspectiva más personal me gustaría añadir que las discusiones que tenemos en este comité se han convertido en uno de los momentos más inspiradores del año; cada encuentro me brinda la oportunidad de aprender de ellos y de compartir su compromiso por difundir conocimientos y aprendizajes.

Al abrir las páginas de este libro, destaca inmediatamente el cuidado estético y la atención al detalle. Y es que el trabajo que lleva a cabo Germinal, la empresa encargada de crear las figuras, dar formato al texto y diseñar esta obra, es simplemente sobresaliente. Los profesionales de Germinal no son solo diseñadores, sino coautores de este libro, pues un buen diseño no solo refuerza el mensaje del texto, sino que también es esencial para hacer comprensible y atractivo su contenido. A lo largo de los años, han sido nuestros compañeros de viaje, y quiero aprovechar esta oportunidad para agradecerles su profesionalidad, creatividad y su notable habilidad para condensar y sistematizar la información, dando lugar a un libro que es a la vez bello y útil. Sin embargo, los verdaderos protagonistas de esta obra son Eugenio Mallol y Fernando Gomollón. Gracias a su valía profesional y dedicación entusiasta a este proyecto, hemos logrado explicar y contextualizar tecnologías que, en ocasiones, pueden parecer complejas o áridas. Finalmente, y aunque pueda parecer obvio, quiero destacar que, sin el apoyo constante de la Fundación Rafael del Pino, este proyecto no sería posible. Desde la primera vez que compartí con Vicente Montes la idea de esta iniciativa, he sentido su apoyo incondicional y decidido. Quiero agradecer a todo el equipo de la Fundación por su ayuda, en especial a Carlota Taboada, incluso en los detalles más pequeños, que son fundamentales para que cada año seamos capaces de producir una obra como la que ahora tienes entre tus manos. Y mi gratitud a la presidenta de la Fundación, María del Pino, y a todos los miembros de su Patronato, por el apoyo a este esfuerzo de difusión de los avances científicos. Como verás, hemos puesto mucho esfuerzo y cariño en la elaboración de este libro que contiene algunas claves importantes para el futuro de España. Por todo ello, te invito no solo a leerlo, sino también a ser protagonista de la aventura que se describe en sus páginas.

Entrevistas



Andrés Pedreño

Catedrático de Economía, cofundador de Torre Juana OST, Eisenhower Fellow (1987), Rector de la Universidad de Alicante (1993-2000) y CEO Universia - Banco Santander (2000-2004)

"LOS VALIENTES NO SE ELIGEN, LOS VALIENTES SE IDENTIFICAN"

¿Cuál es su experiencia, qué es lo que mejor funciona para pasar de las ideas a la acción?

Hay determinadas cosas en las que es muy bueno implicar al equipo, que haya debate y tormenta de ideas, contrastar, reflexionar, se trata de momentos en los que la velocidad en la toma de decisiones no es clave, es más bien la ponderación, el debate enriquecedor y relajante, es muy interesante. Pero cuando hay rapidez, hay que tomar decisiones. La empresa tiene que correr riesgos. Claro que es difícil identificar la decisión correcta. Por qué China va tan deprisa cuando no es un país con instituciones sólidas, que no regula con garantías para los ciudadanos. Porque hay un gobierno con hegemonía económica y militar que establece todos los mecanismos y todas las facilidades para la IA.

Se trata de poner en valor el liderazgo, sin caer en la dictadura.

Hay veces que el liderazgo, entendido democráticamente, significa tener tiempo para convencer, establecer discursos, motivar. Ahora mismo, la IA generativa produce novedades cada mes.

Estamos en un momento en el que quizás los pasos no son secuenciales, con una lógica, no es fácil anticipar lo que va a pasar.

Lo dijo de forma genial, Javier García: es época de valientes, de no tener miedo a equivocarse. Hace falta en este país gente valiente. La IA quema, tiene riesgos, evidentemente. Experimentamos, vamos a aprender, porque China, Irán, Rusia, Israel, van a toda velocidad y nosotros no podemos centrarnos en evitar el fuego, en imponer para cualquier cosa 1.000 permisos.

¿Cuál es el criterio para elegir a los valientes? Estamos creando una sociedad tecnológica muy dada a moverse por modas.

Los valientes no se eligen, los valientes se identifican, los valientes lo demuestran con indicios. Trabajan, son innovadores, son disruptivos, en un momento determinado tienen liderazgo legítimo, saben arrastrar, saben convencer a sus compañeros. Al talento, a la inteligencia, a los valientes, hay que darle un espacio e identificarlos bien, no ponerles piedras ni zancadillas, ayudarles, si es posible motivarles, dándoles información. Muchas veces, no se trata de subvenciones, sino de adquirir su producto y tecnología con compra pública innovadora. Se necesita instituciones valientes, que quieran tener la mejor inteligencia artificial, y lo justifiquen y defiendan con luz y taquígrafos. Si es así, evidentemente, estaremos haciendo una gran sociedad.

Nos tenemos que acostumbrar a la incertidumbre.

Nos estamos equivocando no haciendo el cambio con la aceleración. La inteligencia artificial se ha disparado y cada mes tenemos noticias relevantes. Es tan brutal la revolución, es otra escala de cambio y de capacidades computacionales, no hay tiempo para la zona de confort o la división europea. Hay que transmitirle a la sociedad que estamos en una cultura del cambio acelerado y que tenemos que tomar decisiones valientes, sabias e inteligentes a muy corto plazo.

El reto es potenciar la innovación tecnológica sin renunciar a nuestras raíces.

Estamos en sociedades democráticas, en sistemas políticos avanzados, los ciudadanos tienen unos derechos que deben manifestarse y respetarse continuamente. Si se vulneran debe caer todo el peso de la ley. La IA no puede decidir nada, porque el humano tiene que empoderarse sobre cualquier tecnología. Eso sí, con una política educativa exigente. Un Gobierno valiente debería plantear en los próximos tres años duplicar el presupuesto en educación. El programa más ambicioso que nunca había tenido un país. Porque estamos en una época digital absolutamente acelerada, donde empieza a haber brechas educacionales, de género, de todo tipo.

¿Qué nos falta para ser un territorio en el que los valientes puedan desplegar todo su potencial?

En primer lugar, cuidar el talento, reconocerlo socialmente, darle señales de que está en un país civilizado que apuesta por estas cosas. Muchas veces lo que se necesita es autoestima. Tenemos que hacer una sociedad que atraiga al talento, lo mantenga, lo desarrolle, lo anime, lo empodere. Y poner en valor a las empresas, ¿hay algo más social de una empresa que pague el 100% de impuestos en un país como España, que innove y sea competitiva a nivel mundial, que esté basada en el esfuerzo, en el talento? Como rector nunca he echado en falta el reconocimiento, me ha sobrado, pero como emprendedor sí. Es muy duro, muy duro, pagas impuestos, creas trabajo, compites. Veo a chavales jóvenes que tienen muchísimo mérito, que resisten.

Javier Ventura-Traveset

Lunar Navigation and Moonlight Manager en la Agencia Espacial Europea y Académico de la real Academia de ingeniería de España.

"EUROPA TIENE MUCHAS FORTALEZAS, PERO ES ESENCIAL PASAR A LA ACCIÓN"

En un entorno tan complejo como la Agencia Espacial Europea, en el que no sólo hay que orquestar equipos, sino también intereses nacionales y desafíos tecnológicos, ¿cuál es el secreto para articular la toma de decisiones?

Una de las claves del éxito de la ESA es la existencia de dos tipos de programas: los Obligatorios y los Opcionales. Los primeros, acaparan aproximadamente el 20% de la financiación de sus Estados miembros. Proporcionan estabilidad presupuestaria y permiten definir estrategias a largo plazo. Sus líneas se establecen a través de procesos formales, con una amplia participación de la comunidad científica y de los países miembros. De esta forma estamos definiendo el Programa de Ciencia Espacial de la ESA hasta 2050, Voyage 2050.

El resto se dedica a Programas opcionales, en los que cada país miembro decide si desea contribuir y en qué porcentaje. Esa flexibilidad ha permitido lanzar programas nuevos para los que no había unanimidad, a los que luego se han unido muchos de los países que inicialmente objetaban contra ellos. Los programas de transporte espacial, observación de la Tierra, telecomunicaciones, aplicaciones integradas, navegación por satélite, vuelos tripulados o exploración robótica, están financiados a través de ese mecanismo.

¿Qué criterios se utilizan para establecer prioridades en proyectos como Moonlight?

Es esencial tener muy clara la razón fundamental por la que se desarrolla un proyecto. Las prioridades emergen de forma natural. Queremos poner en órbita lunar la primera infraestructura humana extraterrestre que permita comercializar servicios de comunicación y navegación interoperables para misiones institucionales y comerciales. Es esencial que estén operativos rápidamente para capturar ese mercado lunar incipiente y ser la referencia. Eso implica buscar soluciones basadas en la reutilización de tecnologías bien establecidas.

Queremos también que nuestros servicios sean interoperables con otros. Eso implica definir y liderar desde el principio unos estándares internacionales reconocidos y entender las necesidades de esas futuras misiones para los próximos 10-15 años. Para que sea viable comercialmente, se precisa un apoyo institucional importante al inicio. Debemos pensar en el usuario, explicarle con claridad las ventajas extraordinarias y las reducciones de coste de Moonlight.

¿Qué necesita Europa para pasar a la acción, para transformar su modelo productivo?

Las recetas son bien conocidas. Es necesario seguir aumentando la inversión pública y privada en I+D; promover con determinación la educación en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas; y facilitar la atracción del talento internacional. Se debe propiciar un acceso más eficaz a la financiación para startups y pymes tecnológicas, y resolver la aversión al riesgo de los inversores. Es crucial reducir la burocracia y desarrollar marcos legales robustos y a largo plazo. Además, se debe crear y fortalecer alianzas internacionales robustas, aprovechando nuestro legado en diplomacia, nuestra posición geopolítica y nuestra sensibilidad multicultural. Europa tiene muchas fortalezas intrínsecas, pero es esencial pasar a la acción. Para posicionarse como un líder global tecnológico, lo primero y esencial: que creamos firmemente en ello.

El sector aeroespacial es un ejemplo perfecto de impulso de la innovación a través de la demanda.

La inversión institucional en ciertos servicios puede ser clave para generar esa primera oferta novedosa que active demanda nueva y con ello la creación de modelos comerciales sostenibles. Es lo que estamos intentando en la economía lunar. Nuestro apoyo reduce el riesgo financiero para las empresas que "creen" y desean invertir. Confiamos en actuar como catalizadores de la demanda de otras agencias espaciales y del sector privado. El apoyo institucional de la ESA ha favorecido además el desarrollo de estándares internacionales de comunicación y navegación lunar a través de LunaNET.

Moonlight también impulsa inversiones complementarias en I+D, lo que ha facilitado la creación de prototipos de nuevos receptores de bajo coste, accesibles comercialmente en muy poco tiempo. Es una colaboración público-privada en la que buscamos la simbiosis para compartir riesgos y recompensas, algo de un interés geoestratégico extraordinario para Europa y para nuestra industria.

¿Cuáles son los principales desafíos de Moonlight en los próximos cinco años?

Moonlight es un cambio de paradigma absoluto en el campo de la exploración lunar humana. Con relación a los futuros servicios de navegación lunar, debemos definir cuáles son los sistemas de referencia geodésicos (sería más correcto utilizar el término "selenodéticos") y de tiempo aplicables formalmente para las futuras misiones y para la implantación de una civilización humana en la Luna a largo plazo. Se requerirán consensos internacionales y el desarrollo de tecnologías específicas durante esta misma década.

Emma Fernández

Consejera independiente AXWAY, Metrovacesa, Digital Consumer Bank (Grupo Santander) e Iskaypet

"EUROPA ANTICIPA Y CONCEPTUALIZA BIEN, EL FALLO ESTÁ EN LA IMPLANTACIÓN"

¿Cuál es la receta para articular la toma de decisiones en una organización compleja?

Primero, tienes que saber si estás en un mercado con potencial de crecimiento y si tienes un producto que verdaderamente muchos clientes van a adoptar. Hay que elegir bien dónde queremos estar. Como país y como empresa. Se lo digo a muchas startups: cómo vas a conseguir acceder a los clientes para generar un cash flow que permita reinvertir y crecer. Porque al final hay dos maneras de crecer: una es captar mucho capital, y ahí tenemos el caso de Corea; y la otra es generar cash flow y ahí ya juega más el hecho de tener un mercado donde puedas crecer y unas estructuras muy ligeras.

¿Cómo cambia la perspectiva al pasar de la gestión directa a los consejos de administración?

Cuando eres directivo, tienes la responsabilidad de hacer que otros hagan, de orquestar que las cosas ocurran, tu trabajo está muy orientado a la acción. Cuando eres consejero, tu trabajo está muchísimo más orientado al reto, a la supervisión. Cuando has estado en una carrera de gestión, sabes que se consigue con perseverancia, con control, motivando a la gente y consiguiendo que todo el mundo esté alineado con una visión compartida. Cuando eres consejero, a veces tienes la sensación de 'quita que ya me pongo yo'. Los consejos dedican cada vez más tiempo a asegurarse de que la compañía tiene el equipo directivo adecuado para responder al plan estratégico. Es fundamental que sea capaz de hacer crecer al resto de la organización para no estar trayendo profesionales de fuera.

Para establecer prioridades conviene ir a los fundamentales, ¿cómo se hace?

Hay que distinguir entre lo urgente y lo importante, elegir con criterios de creación de valor y de impacto. Y hay tener una visión a largo e ir implementándola con planes a corto. En las empresas, como en la vida, es importante tener un plan B porque no todo sucede como esperabas ni como lo planificabas. Ese ejercicio de saber girar el timón en un determinado momento requiere también de mucha frialdad y poco apego a si la idea es tuya. A veces el ego te puede perder como directivo.

¿Qué necesita España para pasar a la acción y transformar el modelo productivo?

He repasado la legislación europea sobre política industrial en los últimos tres años. Nos hemos visto obligados a hacerla porque China o Estados Unidos han apoyado a determinados sectores tecnológicos de una manera increíble. Europa anticipa y conceptualiza bien, la deficiencia está en la implantación. Las ejecuciones son muy complejas, muy garantistas, muy fragmentadas, y al final no se consigue tracción suficiente. Hasta los recursos que hemos puesto a disposición de las empresas no les han resultado atractivos por la complejidad de las herramientas.

¿Cómo se consigue que la oferta siga el ritmo de la demanda? En ocasiones, el problema es al revés.

Al igual que hay una Agencia Europea de Defensa que compra los proyectos grandes para distintos países, se necesita que el sector público actúe como un cliente innovador. En Estados Unidos, cuando se conceden ayudas para desarrollar un producto o una innovación a una empresa, se sitúa por encima de cualquier otra en una solicitud de compra pública. En ese caso, la demanda tracciona. Muchas veces, en España, las condiciones de contratación impiden la entrada de una startup o una pyme innovadora. Entonces, ¿para qué le das dinero si no va a poder entrar? Hay que repensar el riesgo como comprador del Estado. A veces no es tan verdad que no hay suficiente gente, es que no estamos dispuestos a asumir el riesgo con esa la oferta. Una analogía: no hay mujeres para los consejos, pero buscas con headhunters y con procedimientos estructurados las encuentras. El problema no es que no haya mujeres, es que no las conoces.

Es muy difícil realmente establecer prioridades. Desde el punto de vista tecnológico, ¿qué tres cosas van a ser necesarias en los próximos años?

Hay un punto muy importante y del que hablamos muy poco: la evolución de la pirámide de población, especialmente en Europa. Hay que priorizar la formación a lo largo del ciclo de vida y definir qué ámbitos se pueden automatizar más para que las personas trabajen en lo que realmente aporta valor. Cuando pensamos en políticas a 10 años vista es un elemento esencial, porque eso es lo que va a definir si una compañía va a ser líder o no: cómo va a incorporar nuevas formas de trabajo.

María José Alonso

Catedrática de Farmacia y Tecnología Farmacéutica de la Universidad de Santiago de Compostela, Fellow del American Institute for Medical and Biological Engineering y de la Controlled Release Society, Premio Rey Jaime I a las Nuevas Tecnologías y Premio Nacional de Investigación Juan de la Cierva.

"HAY UN CUELLO DE BOTELLA EN LA DEMANDA DE CIENCIA DISRUPTIVA"

¿Qué trabajo se lleva a cabo en España, en general, y en el CIMUS, en particular, en las tecnologías presentes en este informe y cuáles son los grupos de investigación, descubrimientos, patentes y empresas que más destacan en el sector?

Sin duda, en la tecnología CRISPR destaca Francisco Juan Martínez Mojica - Universidad de Alicante, considerado uno de los descubridores originales del sistema CRISPR-Cas. Su descubrimiento pionero (1993) consistió en la identificación de las secuencias repetitivas que más tarde se conocerían como CRISPR en arqueas. En la actualidad son muchos los investigadores que usan la tecnología CRISPR, entre otros Lluis Montoliu, especializado en edición genética en mamíferos y modelos de enfermedades raras; Juan Carlos Izpisúa Belmonte, pionero en aplicaciones de CRISPR para rejuvenecimiento celular, Fátima Bosch, de la Universidad Autónoma de Barcelona, quien utiliza CRISPR en modelos animales para el estudio de enfermedades metabólicas, entre otros. En general, son usuarios de la tecnología CRISPR.

En el CIMUS, trabajamos de forma incipiente en el desarrollo de terapias génicas basadas en CRISPR. En cuanto a la tecnología de Fagos es notable la actividad en el ámbito de la biotecnología e investigación agroalimentaria. En cuanto a la IA, hay grandes avances en España en IA en IA aplicada a la salud pública y comportamiento humano, por ejemplo, Nuria Oliver.

Alfonso Valencia, Director del Departamento de Ciencias de la Vida del Barcelona Supercomputing Center, está especializado en bioinformática e IA aplicada a la genómica y biología de sistemas, entre otros. Numerosos investigadores, entre ellos nuestro laboratorio, iniciamos su uso en el desarrollo de fármacos y nanoterapias génicas, así como la predicción de su interacción con sistemas biológicos

Actualmente, muchos problemas y sus posibles soluciones están bien identificados por parte de los expertos (como destacan las ediciones del informe INTEC), por eso la sociedad demanda a todos los actores implicados pasar a la acción. Y es ahí donde probablemente estemos encontrando las mayores dificultades, ¿qué necesitan España y Europa para pasar a la acción y transformar su modelo productivo?

Una inversión clara y modelos de gestión abiertos y facilitadores. Una integración eficaz de la academia en la empresa, según un modelo en el que la empresa se beneficia de los descubrimientos académicos más que de su capacidad de realizar servicios.

¿Dónde están los mayores cuellos de botella de la transferencia de tecnología?

En la demanda real de ciencia y tecnología disruptiva e innovadora por parte de la industria, así como en los modelos de colaboración. La academia ha de escuchar a la empresa y ha de asesorar a la empresa estableciendo alianzas sólidas de ganancia clara para ambos.

¿Cuáles son los principales desafíos en los próximos cinco años dentro del área de la biomedicina y la salud en materia de innovación tecnológica que van a requerir de la colaboración del sector privado y de los centros de investigación?

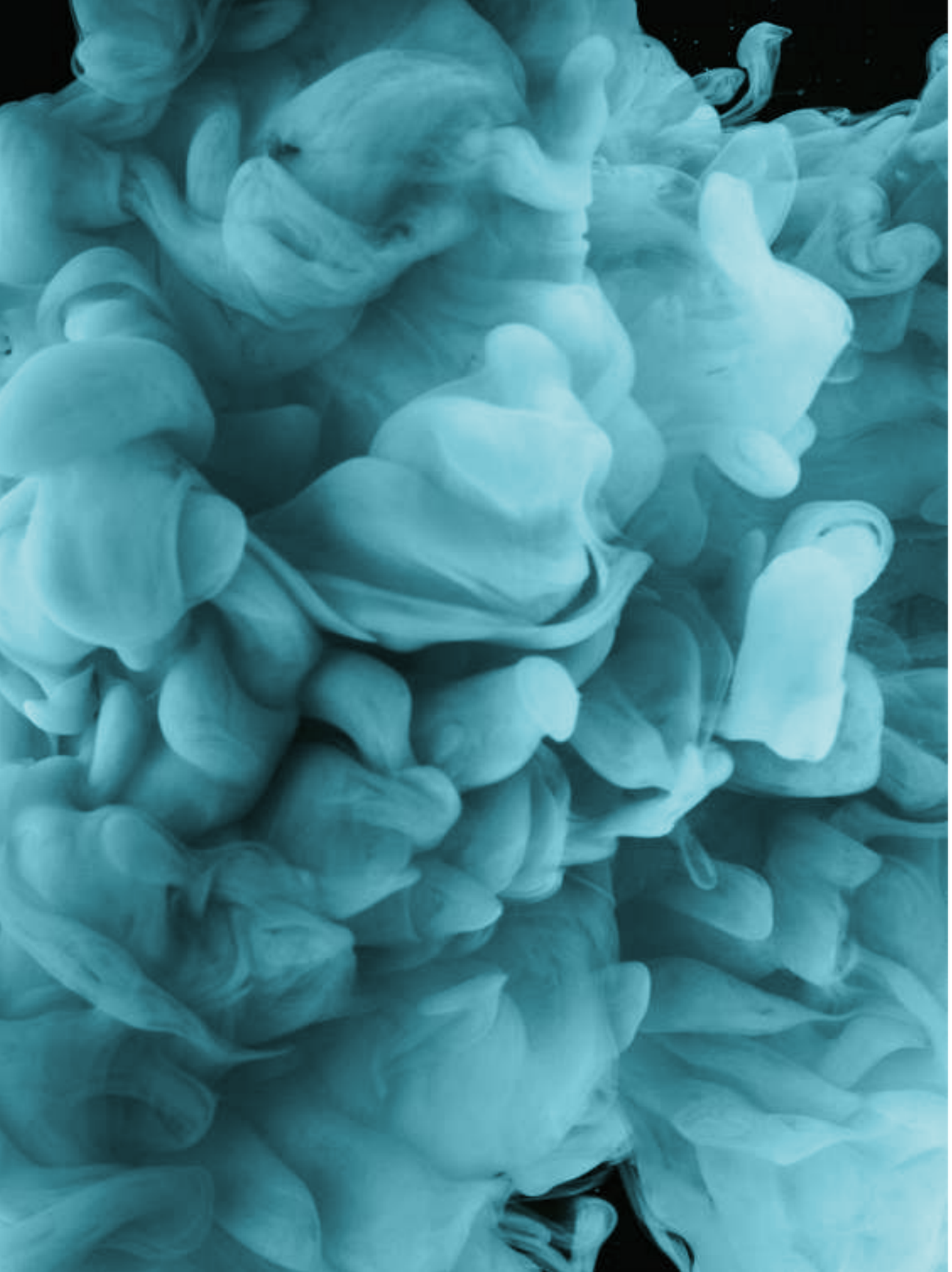
Desde mi perspectiva, el desarrollo de terapias avanzadas y el uso de la IA de forma colaborativa deben afianzarse.

¿Cómo se sitúa España en esta llamada a la acción para poner en práctica las posibilidades que ofrece la ciencia y la tecnología? ¿Estamos bien posicionados, qué debemos mejorar?

Estamos bien en cuanto a lo que la ciencia ofrece pero no en lo que la empresa demanda.

00

Pasar a la acción en la hora de los valientes



Pasar a la acción en la hora de los valientes

La investigadora del MIT Susan Solomon formó parte del equipo científico que viajó en 1986 a la Antártida para reunir los datos que proporcionarían la prueba definitiva de que los clorofluorocarbonos (CFC) eran más eficaces para destruir el ozono allí que en ningún otro lugar del planeta. Un año antes, el British Antarctic Survey había dado la voz de alerta al publicar un artículo científico[1] en el que afirmaba que se había formado un "agujero" inesperado en la capa de ozono sobre su estación. El mundo reaccionó de forma asombrosamente ágil y eficaz a la llamada de la ciencia y en 1987 se firmó el Protocolo de Montreal, que establecía las condiciones para la protección de la capa de ozono, en lo que puede considerarse la mayor historia de éxito ambiental internacional. Cuando, casi 40 años después, Susan Solomon rememora aquella gesta,[2] en la que el conocimiento científico fue capaz de movilizar una sensacional respuesta regulatoria y de innovación tecnológica, vierte también las valiosas lecciones aprendidas. "A la hora de resolver el problema del ozono, nos ayudó una confluencia ideal de lo que yo llamo las tres P: tenía impactos profundamente personales en la salud, su ciencia era fácilmente perceptible para los no expertos y las soluciones eran eminentemente prácticas", escribe. La causa científica se benefició de "un poderoso impulso causado por la acción de los consumidores al alejarse de los CFC en latas de aerosol en EEUU, una elección personal que destruyó el mercado de los CFC estadounidenses e hizo que nuestros productores estuvieran ansiosos por buscar alternativas". Se logró que la gente se sintiera "empoderada e interesada", sentencia. Las políticas de orientación tecnológica en el marco del Protocolo de Montreal llegaron allí donde no podían los individuos, e inspiraron la innovación necesaria para resolver problemas en los que los consumidores tenían menos poder de coerción, como la refrigeración y el aire acondicionado. "Las personas

son mucho mejores para resolver crisis calientes que para lidiar con crisis lentas. La fascinación del público mantuvo a los científicos energizados y a los políticos bien motivados para actuar", dice Solomon. Aquella fue una historia de éxito en una tarea que hoy se ha vuelto imperativa en nuestras sociedades y en nuestras economías, especialmente en Europa: pasar de la identificación del problema a la acción.

"Es el tiempo de los valientes", afirmó el director de la Cátedra Ciencia y Sociedad de la Fundación Rafael del Pino, el científico y emprendedor Javier García, en la presentación del libro *Innovación con futuro* que recoge el contenido del informe INTEC 2023.[3] El Protocolo de Kioto no está logrando el mismo éxito que el Protocolo de Montreal. Las circunstancias hoy difieren de aquellas en las que se dirimió la batalla contra el agujero de la capa de ozono. Asistimos a la confluencia de múltiples revoluciones científico-tecnológicas a una escala nunca antes conocida, en ámbitos como la generación, distribución y almacenamiento de energía, los nuevos materiales sostenibles y la economía circular, la transformación digital, los semiconductores, la inteligencia artificial (IA), los sistemas autónomos, la conquista espacial, la descarbonización o la gestión del talento. Hay también similitudes: el entorno de los años 80 estaba dominado por una división del mundo en bloques, más antagónicos incluso que los actuales, y estaba ensombrecido por la amenaza bélica. Pero el problema del agujero de la capa de ozono no se puede comparar en complejidad con la acción concertada, multisectorial y multipolar que requiere la lucha contra el cambio climático.

Hay, no obstante, un factor diferencial más, de enorme valor cualitativo, resultado de un cambio de raíz estructural, no coyuntural, en la forma en la que se gestiona hoy el conocimiento en el mundo. Hace 40 años, se pudo producir una respuesta unificada al desafío científico gracias al equilibrio entre la iniciativa y la titularidad del conocimiento que servía de base para la innovación tecnológica. Hoy ese equilibrio se ha roto. El liderazgo de los países occidentales ya no es tal y han emergido alternativas, en especial China, que condicionan la concertación de estrategias. Las nuevas opciones no sólo provienen de Estados, también grandes corporaciones están promoviendo nuevas sendas de innovación y exploración que desafían la capacidad para articular los grandes objetivos de la humanidad, desde la conquista del espacio a la explotación de la luna, la monitorización del planeta o las nuevas aplicaciones de la IA generativa, en torno a foros de acuerdo internacional. Es ilustrativo seguir la evolución bursátil de los gigantes tecnológicos desde mediados de la pasada década, cuando el diseño de sus algoritmos pasó de estar definido por la calidad del servicio a los usuarios de sus redes sociales, agregadores de contenido y marketplaces a hacerlo por objetivos financieros.[4] Los productores de aplicaciones de IA generativa pueden ser los siguientes. El sector público nunca ha sido tan dependiente como hoy del conocimiento que genera el sector privado. Pasar de las ideas a la acción corre el riesgo de dejar de ser un impulso de propósito general, para convertirse una estrategia de diferenciación geoestratégica y de competencia en el mercado.

En la propia crisis del COVID-19 se pudo comprobar fehacientemente la fragmentación del mundo del conocimiento en bloques y la incapacidad de actuar de forma plenamente coordinada. La militarización de la economía está contribuyendo a agravar esa dinámica de fraccionamiento. En la última BIO Convention, el evento más importante del año del sector biotecnológico a nivel mundial, estuvo muy presente la necesidad de garantizar la seguridad nacional de EEUU frente a posibles amenazas biológicas. El Gobierno norteamericano tiene una alianza permanente con BIO para colaborar en aspectos que van desde la identificación de brechas en los sistemas de alerta temprana hasta la identificación y vigilancia de amenazas y el desarrollo y distribución de soluciones. Tecnologías de la salud y de seguridad, cada vez más entrelazadas. En la SPIE Defense + Commercial Sensing, un alto cargo de Defensa de EEUU, Dev Shenoy, proclamó que "la microelectrónica sustenta todas las capacidades de los sistemas militares", y apostilló que "la IA debe ser transformadora para la defensa»,[5] porque las tecnologías de la información se han convertido en "un sistema de guerra de misión crítica".

En plena carrera contra el cambio climático, el mundo ahora invierte casi el doble en energía limpia que en combustibles fósiles, pero existen importantes desequilibrios en esa inversión. Las economías de mercados emergentes y en desarrollo, excluida China, representan sólo alrededor del 15% del gasto mundial en energía limpia.[6] En Estados Unidos, estaba previsto que la inversión superara los 300.000 millones de dólares en 2024, 1,6 veces el nivel de 2020 y muy por encima de la cantidad invertida en combustibles fósiles. La Unión Europea gasta 370.000 millones de dólares en energía

limpia, mientras que China habrá destinado casi 680.000 cuando acabe 2024, respaldada por su gran mercado interno y el rápido crecimiento de las llamadas "tres nuevas" industrias: células solares, producción de baterías de litio y fabricación de vehículos eléctricos.

Nada más sintomático que lo que está sucediendo en la apasionante carrera tecnológica por la fusión nuclear. En octubre de 2023, Reino Unido, que había batido el récord mundial de energía generada a partir de la fusión en 2021, lanzó su programa Towards Fusion Energy 2023; en la primavera siguiente, Japón siguió sus pasos; y en junio de 2024, Estados Unidos, tras firmar alianzas con ambos países, desvelaba su Fusion Energy Strategy 2024, que describía como una hoja de ruta "única en el mundo". El 80% de los más de 6.000 millones de dólares invertidos hasta ahora en este apasionante camino han recalado en empresas de fusión estadounidenses. La fusión se ha convertido en una carrera global para el Departamento de Energía norteamericano, pero Ambrogio Fasoli, nombrado a principios de año director de EUROfusion, está advirtiendo de que el ritmo de desarrollo del ITER, el centro de investigación europeo que fue pionero en el mundo en este campo, es irritantemente lento y que Europa debe redoblar sus esfuerzos para posicionarse en la energía de fusión. En otro campo tecnológico fundamental, el dominio de los datos y del software y el hardware de recopilación, almacenamiento, procesamiento y distribución, una cifra resume la realidad de la situación actual en materia de transformación digital: el Barcelona Supercomputing Center, uno de los tres mayores superordenadores de Europa, cuenta con 4.500 chips Hopper de NVIDIA, los más potentes de la actualidad en IA; la empresa Meta dispone de 350.000.

Pasar de las ideas a la acción, siguiendo la metodología de Solomon, implica tener identificadas e interiorizadas las consecuencias de no hacerlo, explicar bien y de forma comprensible el problema y las soluciones y promover medidas prácticas. Hoy podría decirse que el otro gran obstáculo, junto a la fragmentación, la militarización y la polarización global, es el enorme desafío que supone conseguir que la población se muestre "empoderada e interesada" por objetivos comunes, intervenga o no la ciencia en su delimitación. En el impulso de la transformación del modelo productivo, no hay que depositar toda la responsabilidad en las ideas. La mayor garantía de éxito de un propósito es lograr que se convierta en una demanda social y en ese punto queda mucho camino por avanzar en las sociedades libres. La ausencia de una autoridad estatal que imponga el cambio por la vía de la coerción y la restricción, se ve contrarrestada en los países occidentales por la dificultad para establecer un diálogo constructivo con respeto a la diferencia, algo que está poniendo en riesgo el concepto mismo de democracia. A la luz de la Ilustración se le acaba la batería. El auge de los popu-

lismos, de las visiones estrictamente cortoplacistas, de los extremismos, acentuados por las redes sociales, convierten los restos de las viejas proclamas por la igualdad, la fraternidad y la libertad en un repositorio de memes amargos.

Una interesante investigación[7] demuestra hasta qué punto la codificación del conocimiento técnico en la lengua vernácula resultó clave para que los países absorbieran las tecnologías de la Revolución Industrial. La ventaja comparativa se desplazó a las industrias que podían beneficiarse de las patentes, en los países y colonias que tenían acceso a los conocimientos técnicos codificados, y no alcanzó al resto de regiones en igual medida. Japón consiguió subirse a esa ola de transformación cuando su Gobierno codificó el conocimiento técnico disponible en Alemania en 1870. Gracias a ello fue único entre los países no occidentales en industrializarse con éxito durante la primera ola de globalización. La codificación compartida de aquellos días se presenta como una bella analogía, ahora la torre de Babel zozobra.

El informe de Mario Draghi sobre "El futuro de la competitividad de Europa"[8] tiene una cara B en la que se realiza un "Análisis en profundidad y recomendaciones".[9] En ella, se propone una suerte de codificación de los sectores clave para la innovación: energía, materias primas críticas, redes de banda ancha de alta capacidad y velocidad, digitalización y tecnologías avanzadas, computación e inteligencia artificial, semiconductores, industrias intensivas en energía, tecnologías limpias, automoción, defensa, espacio, farmacéutico y transporte. Podría interpretarse como taxonomía de los sectores económicos más relevantes. La visión ya no es de producto (textil, cerámica, mueble...), sino que la atención se traslada a las tecnologías habilitadoras (todas las relacionadas con componentes digitales y el mundo TIC) y hacia los grandes agregadores de productos y servicios, entre los que encontramos ausencias estridentes como la salud, las infraestructuras o la agroalimentación. La clave es que Europa no ostenta el liderazgo en ninguna de las áreas relevantes incluidas en el listado de sectores de Draghi, según un informe de Digital Europe.[10] En semiconductores avanzados, Europa se encuentra a un 45% de las mejores prácticas mundiales; en el caso de la IA, apenas llega al 53%; en biotecnologías de la salud y computación cuántica la brecha respecto de las mejores prácticas mundiales es también sustancial, apenas alcanza el 57%; cuatro puntos por arriba se encuentran las tecnologías energéticas, aunque llegan sólo al 61% del top global; en las tecnologías del espacio y la fabricación aditiva Europa está al 69% del máximo desarrollo; el mejor resultado se obtiene en conectividad avanzada (71%).

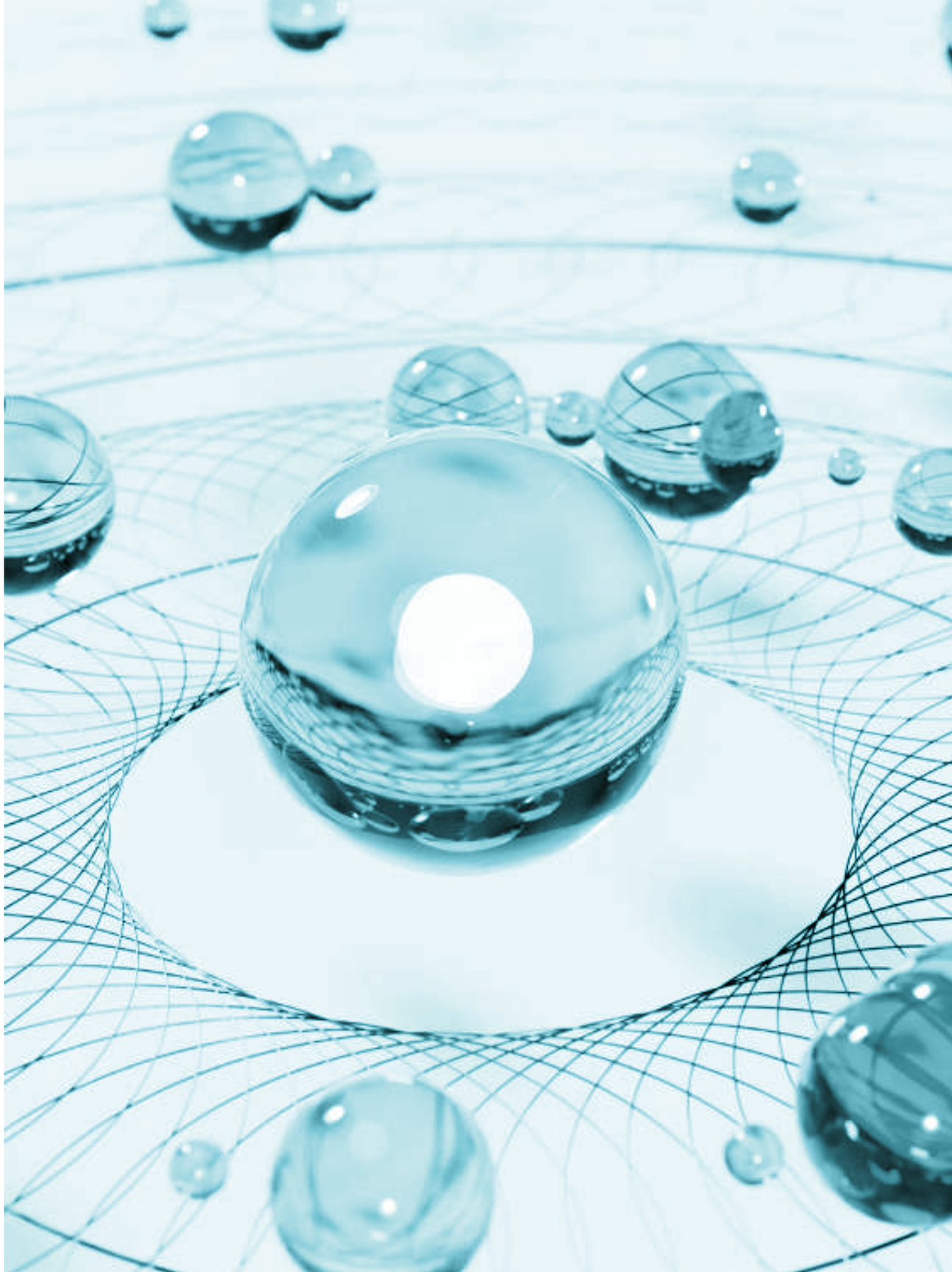
En su llamada de alerta sobre nuestro particular *agujero de ozono innovador*, Draghi dice que la brecha de la UE en tecnologías digitales y avanzadas puede afectar el funcionamiento de otros sectores y pide "acciones políticas significativas y específicas". Hasta la ventaja comparativa de la UE en tecnologías *verdes* se está viendo cada vez más cuestionada porque China se está poniendo al día, y su número de patentes aumenta rápidamente. "Las actividades de innovación de la UE se concentran principalmente en sectores con una intensidad de I+D media a baja", lo que "podría empujar a la UE a una 'trampa de tecnología media'", dice el informe. En las últimas dos décadas, las tres principales empresas de la UE han pertenecido sistemáticamente al sector del automóvil y han mostrado cambios mínimos en su clasificación. Se puede discutir si la mejor forma de paliar esta deriva preocupante es una nueva campaña de inyección de gasto público (800.000 millones de euros de inversión al año), un modelo de impulso de la I+D europeo que evite la fragmentación nacional, regional y local (poniendo en cuestión toda la red de instituciones e infraestructuras que se han ido desarrollando en las últimas tres décadas al amparo del modelo anterior), mejores mecanismos de impulso de la innovación a través de la demanda pública y una apuesta por los centros de investigación de excelencia. Se podrán plantear alternativas a la solución que plantea Draghi, pero la meta es clara: Europa y España deben recuperar la soberanía tecnológica y el liderazgo no sólo en la ciencia de frontera, sino también en la traducción de sus hallazgos en forma de tecnología.

Hay que pasar de las ideas a la acción, es la hora de trabajar con las "luces largas", otra de las imágenes que suele utilizar Javier García. Eso supone actuar rápido y de forma más eficiente. "En España no existe una única institución dedicada a la productividad", dice la OCDE en el informe[11] que analiza la situación de nuestro país. Uno de los grandes problemas del lento crecimiento de la productividad laboral es que se concentra en las empresas y regiones más rezagadas desde el punto de vista de desarrollo tecnológico y, por lo tanto, "coincide con la profundización de las desigualdades económicas", añade. Mientras que el 5% superior de las empresas

más productivas de España, las llamadas empresas frontera, muestran un crecimiento "saludable" de la productividad laboral (alrededor del 2% anual de media), comparable al de otros países de la OCDE, el crecimiento de la productividad laboral entre las llamadas empresas rezagadas, "ha quedado reducido considerablemente". El patrón es similar en el caso de las regiones, y podría decirse que en el de los ciudadanos, por extensión. La productividad es el CFC de España.

Como cada año, el informe INTEC pretende servir de referencia para la toma de decisiones, para pasar de las ideas a la acción, en los ámbitos identificados por los miembros del comité de expertos de la Cátedra Ciencia y Sociedad, entre los que se encuentran destacados representantes del mundo de la ciencia y la economía. Es una llamada de esperanza porque se elabora a partir de la identificación se espacios de oportunidad en España, ya sea para la resolución de problemas sociales y económicos, como para la profundización en áreas en las que nuestro tejido investigador y empresarial ha alcanzado cotas de excelencia o la diversificación hacia nuevos horizontes de crecimiento basado en la tecnología y la innovación. El capítulo dedicado a analizar la gestión del agua en la agricultura resulta más pertinente que nunca, porque España es un territorio de innovadores en este ámbito y afronta un escenario hídrico complicado en el futuro.

Era necesario explorar las posibilidades que abre la IA en dos ámbitos cruciales para nuestro futuro. En el caso del idioma español, la tecnología no puede convertirse en un factor de distanciamiento y discriminación cultural, en el que se imponga una determinada singularidad lingüística sin considerar toda la riqueza de nuestra lengua y de las diferentes expresiones locales y regionales. Es necesario intervenir en los mecanismos de entrenamiento de los nuevos modelos de lenguaje extenso (LLM) y tomar la iniciativa en su implementación. El segundo asunto en torno a la IA que aborda el informe no podría resultar más crítico para el comité de expertos: la educación. En la dinámica actual de concentración de conocimiento en



grandes hubs de excelencia, los sistemas educativos que se doten de las herramientas más eficaces para potenciar la formación de la población, si quieren garantizar la igualdad de oportunidades. Asistimos a una de las mayores crisis de disponibilidad de talento de la historia, probablemente no ha existido ninguna igual, se trata de un tema indiscutible.

La conquista del espacio se asemeja a lo que supuso hace cuatro décadas el inicio de la carrera de conectividad que desembocó en internet. España demostró una capacidad admirable para posicionarse en el sector de las telecomunicaciones y cuenta con un tejido empresarial altamente competitivo en la tecnología de satélites. Pero el cambio que se está produciendo ahora es de una escala sin precedentes. El éxito de PLD Space al convertirse en la primera startup europea capaz de enviar un cohete al espacio debe servir de motivación para impulsar el ámbito de los lanzadores, y es urgente posicionarse de forma estratégica en el mercado de las megaconstelaciones de satélites que, más allá de los aspectos controvertidos que haya que abordar para que se desplieguen de forma segura, actuarán como la nueva red de comunicaciones esencial del mundo.

España está tomando iniciativas muy interesantes en el ámbito de los nuevos carburantes, alternativos a los de origen fósil, tanto los que proceden de residuos como los que pueden producirse de forma completamente verde como el metanol. En ambos casos, existen certezas que permiten pensar en una progresiva implantación en el mercado, aunque sea inicialmente en nichos de actividad específicos como el tráfico marítimo o las flotas de transporte terrestre. Uno de los grandes vectores de cambio será la aviación, un sector en el que España cuenta con una enorme presencia industrial y una larga trayectoria de innovación. A partir de 2035, las aeronaves que conocemos hoy empezarán a ser sustituidas por otras mucho más sostenibles, tanto en lo que se refiere al combustible como en los materiales. Se trata de una de las grandes carreras tecnológicas del momento, con muchas incógnitas todavía por resolver.

El informe INTEC siempre reserva un apartado destacado a las tecnologías vinculadas a la salud, directamente implicadas en la mejora de las condiciones de vida y bienestar de las personas. Después del éxito en su aplicación en las vacunas, conviene seguir de cerca la evolución de las tecnologías vinculadas al CRISPR y todas las oportunidades que se abren para España en este ámbito. Es creciente, asimismo, el interés de los investigadores por las posibilidades asociadas al resurgir de los fagos, como alternativa a la medicación química, para combatir los virus más resistentes. Otras sociedades han entrado en ese debate en profundidad y la nuestros no debe quedar al margen.

Este trabajo va más allá, por consiguiente de ser una llamada a la acción. Aunque la frase "que innoven otros" se atribuye a Henry Ford, se ha convertido en un lugar común a evitar en nuestro país, una suerte de desencanto acerca de nuestras propias posibilidades que la evidencia desacredita en cuanto éstas se analizan con detenimiento. Claro que podemos innovar nosotros. De hecho, en este trabajo no sólo se propone pasar a la acción, siguiendo las indicaciones de Susan Solomon, si se quiere, sino que además se ofrecen vías y claves para hacerlo atendiendo a nuestras necesidades y al talento disponible.

Relación de notas

[1] J. C. Farman, B. G. Gardiner, J. D. Shanklin, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction, Nature, 1 de mayo de 1985, doi.org/10.1038/315207a0.

[2] Susan Solomon, "How We Solved the Hole in the Ozone", nautil.us, 3 de julio de 2024.

[3] https://frdelpino.es/ciencia-y-sociedad/javier-garcia-insta-a-poner-las-luces-largas-y-a-aumentar-la-velocidad-del-cambio-en-la-presentacion-de-innovacion-con-futuro/

[4] Tim O'Reilly, Ilan Strauss, Mariana Mazzucato, Rufus Rock, "To understand the risks posed by AI, follow the money", *The Conversation*, 10 de abril de 2024.

[5] William Schulz, "SPIE DCS highlights efforts by US and NATO to innovate in photonics", optics.org, 24 de abril de 2024.

[6] World Energy Investment 2024, IEA, junio de 2024.

[7] Réka Juhász, Shogo Sakabe, David Weinstein, "Codification, technology absorption, and the globalization of the industrial revolution", NBER, julio de 2024.

[8] "The future of European competitiveness", Comisión Europea, septiembre de 2024.

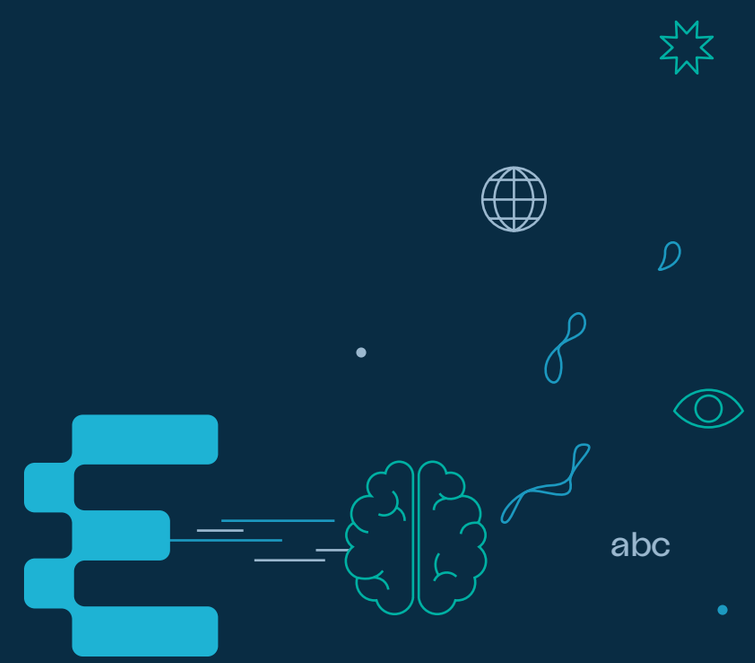
[9] "The future of European competitiveness Part B | In-depth analysis and recommendations", Comisión Europea, septiembre de 2024.

[10] "The EU's critical tech gap", Digital Europe, 2024.

[11] "Reviving Broadly Shared Productivity Growth in Spain", OCDE, 5 de junio de 2024.

01

IA en Español



Una IA que piense en español

Los modelos de lenguaje grande (también llamados modelos de lenguaje de gran tamaño o LLM, por sus siglas en inglés), han experimentado un crecimiento sin precedentes, especialmente desde la popularización de ChatGPT a finales de 2022.[1] Estos modelos, que son en realidad sistemas y programas de inteligencia artificial entrenados con cantidades enormes de textos, han revolucionado varios sectores de la industria, mucho más allá de la informática y la computación. La capacidad de los LLM para realizar y automatizar tareas complejas, como la redacción de textos, la traducción, el resumen de reuniones e informes e incluso atención al cliente, ha demostrado el enorme potencial de esta tecnología. Con la llegada de ChatGPT 4o (una abreviatura de "omni", que en latín significa "todo") estos modelos son capaces de interpretar instrucciones en tiempo real a partir de fotografías y grabaciones de audio y vídeo, tal y como imaginaban hace décadas decenas de películas de ciencia ficción.[2] Sin embargo, a pesar del avance de las capacidades de traducción, estos sistemas LLM presentan un problema intrínseco cuando se trata de manejar datos y textos en otros idiomas, como el español. Al haber sido entrenados y educados con miles de gigabytes de información en inglés, muchos modelos de lenguaje no son tan ágiles expresándose en la lengua de Cervantes, lo cual plantea muchos retos y oportunidades, de cara al desarrollo de mejores sistemas para aplicaciones multilingües.[3]

Impregnar a la IA de cultura y no sólo de lengua

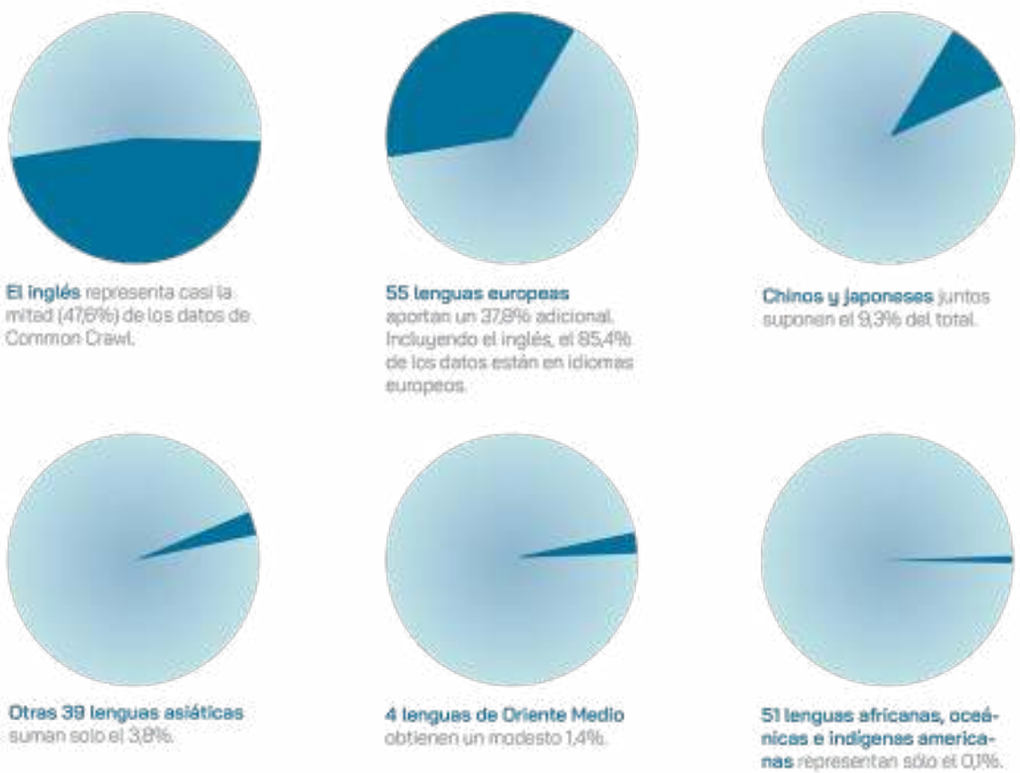
POR DENTRO

Los LLM no son un descubrimiento reciente. Su desarrollo abarca décadas de trabajo en campos como la inteligencia artificial y el procesamiento del lenguaje natural. Ya en la década de 1950, cuando se desarrollaron los primeros ordenadores, comenzaron los intentos por comprender y generar lenguaje humano y se introdujo el concepto de "autómatas" y "gramáticas formales",[4] en gran parte gracias a pioneros como el lingüista Noam Chomsky y el informático Alan Turing.[5] Estos primeros modelos utilizaban reglas gramaticales bastante estrictas y, por lo tanto, tenían una capacidad bastante limitada para manejar la ambigüedad y la variabilidad del lenguaje natural. Durante las décadas siguientes, se desarrollaron métodos estadísticos y basados en reglas probabilísticas, como los Modelos Ocultos de Markov y los algoritmos de árboles de decisión, que mejoraron la capacidad de las máquinas para analizar y generar lenguaje. Más adelante, en la década de 1990 y principios de los 2000, llegaron los modelos de lenguaje basados en redes neuronales recurrentes, que permitieron a las máquinas manejar secuencias de datos y contextos más largos, algo que mejoró sustancialmente su capacidad para procesar el lenguaje natural. Sin embargo, estas técnicas aún presentaban algunos problemas y desafíos, especialmente a la hora de afrontar la escalabilidad.[6]

La verdadera revolución llegó en 2017 con la introducción de los "transformadores" (*transformers*), unas variables informáticas que utilizan un mecanismo para evaluar la importancia relativa de cada palabra en una frase, lo que facilita al mismo tiempo la comprensión de los datos de entrenamiento y la generación de texto más coherente, más convincente y, sobre todo, más contextualmente relevante. Los transformadores, descritos por primera vez por un equipo de ingenieros de Google,[7] permiten un manejo del texto mucho más eficiente, dado que facilitan la detección de dependencias y relaciones entre palabras incluso a una gran distancia, algo que permite mejorar tanto la precisión como la versatilidad de los LLM. Los transformadores son tan importantes que, todavía a día de hoy, están detrás de las siglas del modelo de lenguaje más popular: el Generative Pre-trained Transformer, conocido comúnmente como GPT.[8] Los primeros modelos de GPT se remontan a 2018, cuando la empresa OpenAI –que a mediados de 2024 había pasado a ser, en gran parte, propiedad de Microsoft,[9] con un 49% de las acciones– lanzó el primer modelo de este tipo, seguido por las versiones mejoradas GPT-2, en 2019, y GPT-3, en 2020. Estos modelos demostraron una capacidad de generación de texto coherente y relevante sin precedentes, además de otras habilidades como la traducción y el resumen de textos, gracias al entrenamiento basado en enormes cantidades de texto.

El lanzamiento del "chatbot" ChatGPT al gran público, marcó un punto de inflexión en la popularización de los LLM. Entre otras cosas, porque no solo demostró la capacidad técnica de estos modelos, sino también su aplicabilidad práctica en diversos sectores mucho más allá de la informática, gracias a su habilidad para mantener conversaciones aparentemente naturales, responder preguntas complejas y realizar tareas específicas.[10] Desde entonces, el desarrollo de nuevos modelos de lenguaje no ha dejado de crecer, con mejoras en la eficiencia, la precisión e incluso las interacciones y las respuestas en tiempo real que introduce la nueva versión de ChatGPT 4o. Sin embargo, el crecimiento de estos sistemas de inteligencia artificial también ha planteado nuevos retos –y nuevas preguntas–, como la preocupación sobre la transparencia y la ética de los LLM, la creación y la perpetuación de sesgos y el impacto climático y medioambiental que suponen tanto el entrenamiento como la utilización de esta tecnología. El propio Chomsky, pionero de los modelos de lenguaje hace más de 60 años, ha llegado a decir que ChatGPT en realidad promete algo imposible: no son herramientas de conversación, sino simplemente máquinas que analizan la probabilidad y los patrones de forma muy eficiente. Crean correlaciones, pero nunca explicaciones, no tienen capacidad crítica.[11] Pero son realmente convincentes y, en cualquier caso, necesitarán una serie de regulaciones y políticas para garantizar un uso responsable, tal y como ha anticipado la Unión Europea con uno de los primeros marcos regulatorios para la inteligencia artificial, para garantizar la seguridad y los derechos fundamentales de los ciudadanos.[12]

Los datos de GenAI reflejan un fuerte sesgo inglés y europeo



Fuente: Investigación CSA

La evolución de los LLM se ha centrado en el entrenamiento y la educación con textos en inglés, lo que ha limitado significativamente su utilidad y, quizás todavía más importante, su aplicación a nivel global. Inicialmente, la mayoría de los avances en el procesamiento del lenguaje natural utilizaron el inglés por comodidad, así como por la disponibilidad de grandes catálogos de texto y recursos en este idioma. Sin embargo, muy pronto la comunidad investigadora empezó a reconocer las limitaciones de un modelo monolingüe y a valorar la importancia y la necesidad de desarrollar modelos robustos en otros idiomas, especialmente para fomentar la inclusión digital de una forma diversa e inclusiva. Los esfuerzos para entrenar a los LLM en otros idiomas se enfrentaron a grandes desafíos, sobre todo debido a la escasez de datos digitalizados. En este sentido, en los últimos años, han surgido proyectos que aprovechan información traducida disponible de forma gratuita en internet para entrenar modelos de lenguaje multilingües, como el Europarl Corpus, basado en datos públicos publicados por el Parlamento Europeo,[13] y Common Crawl, basado en el análisis de páginas web de todo el mundo. Este último también ha planteado problemas en cuestiones como el copyright y los derechos de autor, dado que utiliza fuentes de datos protegidos por diferentes tipos de licencias de propiedad intelectual y rara vez cita a los autores, tal y como reveló en exclusiva el Washington Post muy recientemente.[14]

Los "transformadores" que permitieron el avance de modelos como ChatGPT también fueron una tecnología clave para entrenar al modelo mBERT, un modelo multilingüe que permitió comprender y generar texto en varios idiomas. Esto no solo mejoró la precisión de la inteligencia artificial en diferentes lenguas, incluido el español, sino que también facilitó la transferencia de conocimientos entre idiomas.[15] Los entrenamientos en idiomas más allá del inglés permiten, en primer lugar, que las tecnologías avanzadas de inteligencia artificial sean accesibles a un público más amplio, independientemente de su lengua materna. Esto es esencial para garantizar la igualdad en temas de transformación digital y para asegurar un avance democrático de la tecnología, que permita que los beneficios de los LLM lleguen a todo el mundo. Además, entrenar modelos en múltiples idiomas mejora la capacidad intrínseca de estos sistemas para manejar el lenguaje y sus estructuras, además de aumentar su "bagaje" cultural y diversidad lingüística, un detalle vital, no solo en tareas como la traducción automática y la búsqueda de información, sino especialmente en la interacción a través de conversaciones, donde un entrenamiento multilingüe puede garantizar una mayor naturalidad; porque los LLM entrenados en varios idiomas pueden captar matices y contextos específicos de cada lengua, incluidas particularidades culturales, refranes populares y expresiones.[16]

ANDRÉS PEDREÑO

El desarrollo de inteligencia artificial en español es clave para asegurar la inclusión y la competitividad de los países hispanohablantes en la revolución tecnológica global. La mayoría de las herramientas actuales están entrenadas principalmente en inglés, lo que deja a millones de usuarios en desventaja. Apostar por una IA en español no solo democratiza el acceso a tecnologías avanzadas para más de 500 millones de personas, sino que también impulsa el desarrollo de soluciones lingüísticas adaptadas a nuestras particularidades culturales y regionales. A nivel económico, puede fortalecer industrias como la educación, la atención al cliente y el comercio electrónico, donde el idioma es una barrera crítica.

Por último, un aspecto interesante –y, quizás, más inexplorado– de los modelos multilingües es el fomento de la investigación sobre lenguas subrepresentadas y en peligro de extinción. La inclusión de estos idiomas en los métodos de entrenamiento de la inteligencia artificial contribuye a una mejor documentación de estos idiomas y, en el futuro, podría promover su uso en el mundo digital, de modo que se contribuiría a su preservación y revitalización, de forma similar a los bancos de semillas y bancos de ADN que guardan información sobre especies en peligro de extinción para, potencialmente, rescatarlas en un futuro cercano.[17]

El español es una de las lenguas más habladas en el mundo, la segunda en número de hablantes nativos y la cuarta en número de hablantes totales, según los datos de la base de datos mundial Ethnologue.[18] En total, más de 560 millones de personas en los cinco continentes hablan español, un idioma que trasciende fronteras geográficas y culturales y, aún a día de hoy, desempeña un papel vital en la comunicación internacional y el desarrollo económico. Sin embargo, a pesar de estas estadísticas, el español estaba infrarrepresentado en los LLM, al menos hasta la llegada del impulso que permitieron los proyectos estratégicos para la recuperación y transformación económica (PERTE), en particular el programa para la "nueva economía de la lengua", dotado con 1.100 millones de euros.[19] Dentro de este programa de financiación se enmarca el sistema MarIA, un modelo de lenguaje creado por el Barcelona Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación a partir de los archivos digitales de la Biblioteca Nacional. El volumen y la capacidad de MarIA han logrado situar al español en los primeros puestos entre los LLM de acceso abierto, tan solo por detrás del inglés y el mandarín. Aunque la primera versión de MarIA utilizaba una tecnología, llamada RoBERTa, basada en modelos de lenguaje BERT –sistemas que generan una interpretación a partir de una secuencia de texto para, por ejemplo, clasificar documentos, responder a preguntas tipo test, encontrar similitudes semánticas en diferentes textos–, la última versión está creada con sistemas GPT-2 que permiten ampliar las capacidades del sistema, entre ellas la generación de nuevos textos a partir de una secuencia. Gracias a las propiedades de GPT, MarIA puede hacer resúmenes automáticos, redactar textos complejos a partir de "inputs" sencillos, generar preguntas y respuestas e, incluso, mantener diálogos complejos que dan la impresión de naturalidad.

Esta inteligencia artificial ha sido entrenada con más de 135.000 millones de palabras, procedentes de distintos archivos guardados y catalogados por la Biblioteca Nacional, que suponen un total de unos 570 gigabytes de datos. Además, han sido necesarias más de 9,7 trillones de operaciones del ordenador Mare Nostrum 4, en el Barcelona Supercomputing Center, para filtrar y catalogar todos los escritos analizados, eliminar todos los fragmentos poco relevantes (como figuras, frases inacabadas, anglicismos y segmentos en otros idiomas) y, por supuesto, entrenar las redes neuronales del modelo. Según las fuentes del Ministerio para la Transformación Digital, modelos de LLM como MarIA "multiplicarán las oportunidades económicas para las empresas y la industria tecnológica española." Estos sistemas pueden ser de gran utilidad también para las administraciones públicas, gracias a aplicaciones como la escritura, el resumen de documentos legales, y la búsqueda de información en grandes bases de datos de texto. Hasta ahora, todos estos sistemas estaban desarrollados mayoritariamente en inglés, lo que limitaba las aplicaciones en español por las diferencias léxicas y, sobre todo, gramaticales entre los dos idiomas.[20]

Para Elena González Blanco, filóloga y experta en inteligencia artificial, el desarrollo de LLM en español es "una misión social (para) darle a nuestra lengua el estatus que se merece en tecnología". Por eso fundó la empresa Clibrain, que trabaja para aumentar el entrenamiento de los modelos de lenguaje con catálogos más amplios en español, incluyendo la Biblioteca Nacional, como el sistema MarIA del Barcelona Supercomputing Centre, pero también la Real Academia Española, academias de la lengua de Latinoamérica y datos locales, disponibles de forma pública en España y otros países, como periódicos, blogs, páginas web y libros digitales.[21] En 2023, la empresa Clibrain presentó su propio LLM basado en GPT-3, al que bautizaron con un nombre muy ibérico: LINCE. Este modelo es el resultado de un riguroso proceso de desarrollo y entrenamiento de modelos de lenguaje que utiliza un banco de datos completamente nuevo para ofrecer unos resultados sobresalientes en español. Clibrain ofrece dos versiones de su modelo LINCE: ZERO, una versión abierta, publicada bajo una licencia open source basada en más de 7.000 millones de parámetros, que permite su utilización en aplicaciones sin fines comerciales y LINCE, una versión "para empresas" con un tamaño seis veces mayor y una capacidad aún más robusta para el procesamiento del español, incluida la interpretación

de dialectos y rasgos característicos de zonas específicas.[22] Además, Clibrain también ha publicado una API –un conjunto de reglas y protocolos que permite que distintos programas informáticos se comuniquen, fundamental en el desarrollo de software con capacidades integradas– que permite la incorporación de LINCE en aplicaciones externas, de una forma similar a la adoptada por OpenAI y ChatGPT. De este modo, han desarrollado aplicaciones como Clichat, Clibot y Clicall, que permiten interactuar con LINCE en forma de chats y aplicaciones de productividad.[23]

Mucho más recientemente, a mediados de abril de 2024, el Gobierno también anunció una nueva colaboración con la multinacional informática IBM para fomentar el desarrollo de modelos, no solo en español, sino también en las otras lenguas cooficiales del estado – catalán, valenciano, gallego y euskera. Ampliar los modelos disponibles en español ayudará, según IBM, a potenciar una utilización más ética de la inteligencia artificial, así como a la democratización y el crecimiento sostenible de esta tecnología, tanto en España como en Latinoamérica y otros países de habla hispana.[24] En este sentido, la Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial, presentada en mayo de 2024, también supone un avance significativo en términos de regulación de los riesgos y las implicaciones éticas y garantiza un desarrollo que prioriza los usos en la investigación y la industria, gracias a una dotación presupuestaria de 1.500 millones de euros en los próximos dos años.[25] Por lo tanto, parece que el futuro de la inteligencia artificial y, en particular, los modelos de lenguaje en español, es prometedor, con un gran potencial para transformar la forma en que interactuamos tanto con la tecnología como entre nosotros en el mundo hispanohablante.[26] Se espera que el avance de los LLM entrenados en español, junto con mejoras en la capacidad de procesamiento y la digitalización –que afecta directamente a la disponibilidad de datos– conduzca a sistemas más sofisticados y adaptables, listos para comprender y generar texto en español con mayor precisión y naturalidad.

Ejemplos de prácticas de selección de fuentes

- Empresa
- Familia de modelos
- Declaraciones relevantes sobre la selección de fuentes

Anthropic	OpenAI
Claude 3	GPT-4
"Los modelos de Claude 3 se entrenan con una combinación patentada de información disponible públicamente en Internet a partir de agosto de 2023, así como datos no públicos de terceros, datos proporcionados por servicios de etiquetado de datos y contratistas pagos, y datos que generamos internamente... "Cuando Anthropic obtiene datos al rastrear páginas web públicas, seguimos las prácticas de la industria con respecto a las instrucciones de robots.txt y otras señales que los operadores de sitios web utilizan para indicar si permiten el rastreo del contenido de sus sitios. De acuerdo con nuestras políticas, el rastreador de Anthropic no accede a páginas protegidas con contraseña o de inicio de sesión ni elude los controles CAPTCHA, y realizamos la debida diligencia con los datos que utilizamos". "Anthropic opera su sistema de rastreo de forma transparente, lo que significa que los operadores de sitios web pueden identificar fácilmente las visitas de Anthropic y señalar sus preferencias a Anthropic".	"GPT-4 es un modelo de estilo Transformer entrenado previamente para predecir el siguiente token en un documento, utilizando tanto datos disponibles públicamente (como datos de Internet) como datos con licencia de proveedores externos... "Dado el panorama competitivo y las implicaciones de seguridad de los modelos a gran escala como GPT-4, este informe no contiene más detalles sobre la arquitectura (incluido el tamaño del modelo), el hardware, el cómputo de entrenamiento, la construcción del conjunto de datos, el método de entrenamiento o similares". "GPT-4 ha aprendido de una variedad de fuentes de datos con licencia, creadas y disponibles públicamente, que pueden incluir información personal disponible públicamente".

Meta	Google	Instituto de Innovación Tecnológica
Llama 3	Gemini	Falcon
"Llama 3 se entrenó previamente con más de 15 billones de tokens de datos de fuentes disponibles públicamente". "Los datos de ajuste incluyen conjuntos de datos de instrucciones disponibles públicamente, así como más de 10 millones de ejemplos anotados por humanos. Ni los conjuntos de datos de preentrenamiento ni los de ajuste incluyen datos de usuario de Meta... Los datos de preentrenamiento tienen un corte de marzo de 2023 para los modelos 8.000 millones y diciembre de 2023 para los modelos 70.000 millones respectivamente". "Para entrenar el mejor modelo de lenguaje, la curación de un conjunto de datos de entrenamiento grande y de alta calidad es primordial. En línea con nuestros principios de diseño, invertimos mucho en datos de preentrenamiento. Llama 3 está preentrenado con más de 15T tokens que se recopilaron de fuentes disponibles públicamente. Nuestro conjunto de datos de entrenamiento es siete veces más grande que el utilizado para Llama 2 e incluye cuatro veces más código. Para prepararse para los próximos casos de uso multilingües, más del 5 % del conjunto de datos de preentrenamiento de Llama 3 consta de datos de alta calidad que no están en inglés y que cubren más de 30 idiomas".	"Los modelos Gemini se entrenan en un conjunto de datos que es multimodal y multilingüe. Nuestro conjunto de datos de preentrenamiento utiliza datos de documentos web, libros y código, e incluye datos de imagen, audio y video". "Nuestro conjunto de datos de preentrenamiento incluye datos provenientes de muchos dominios diferentes, incluidos documentos web y código, e incorpora contenido de imagen, audio y video. Para la fase de ajuste de instrucciones, ajustamos los modelos Gemini 1.5 en una colección de datos multimodales (que contienen instrucciones emparejadas y respuestas apropiadas), con un ajuste adicional basado en datos de preferencia humana".	"Reunimos un conjunto de datos de preentrenamiento de 3500 mil millones de tokens, provenientes principalmente de nuestro trabajo en RefinedWeb (Penedo et al., 2023), un conjunto masivo de datos web filtrados y 'deduplicados'". "Entrenamos modelos pequeños de 1.000 millones en 30.000 millones de tokens, con los datos de preentrenamiento divididos entre datos web y una categoría curada específica. Tomamos muestras de entrenamiento en el 1, 10, 25, 50, 75 y 100% de la categoría objetivo. Solo consideramos un enfoque unidimensional y mezclamos datos web con una única categoría de datos seleccionados. Dividimos nuestras categorías en libros, conversaciones y datos técnicos". "Para los corpus individuales que forman estas categorías, nos inspiramos en The Pile (Gao et al., 2020), que mejoramos con datos de Reddit (Baumgartner et al., 2020) para la categoría conversacional. Nuestros datos web se toman de RefinedWeb (Penedo et al., 2023) y procesamos fuentes seleccionadas a través de un proceso similar, aplicando filtrado y deduplicación para lograr una comparación justa".

Fuente: Stanford Cyber Policy Center

Tecnología con variantes lingüísticas

EN ACCIÓN

El uso del español crece a una media del 7,5% anual. El Perte de Nueva Economía de la Lengua se diseñó con el objetivo de conseguir una inteligencia artificial (IA) capaz de procesar adecuadamente en español, que "piense en español",[27] afirma textualmente, para, a partir de ahí, crear una industria basada en tecnologías como el procesamiento del lenguaje natural, la traducción automática y los sistemas conversacionales. El reto presenta muchos factores de complejidad. Diferenciar las múltiples variedades de español exige conocer no sólo las variantes léxicas, sino también la fonética e incluso el contexto en el que se utilizan determinadas expresiones, matices que se pierden fácilmente en la traducción. Se da la paradoja de que existen gran cantidad de datos disponibles en español, pero muchos no se pueden utilizar porque a menudo son propiedad de empresas privadas y, si pertenecen a instituciones públicas y culturales, se encuentran aislados en silos y no son de fácil acceso.[28]

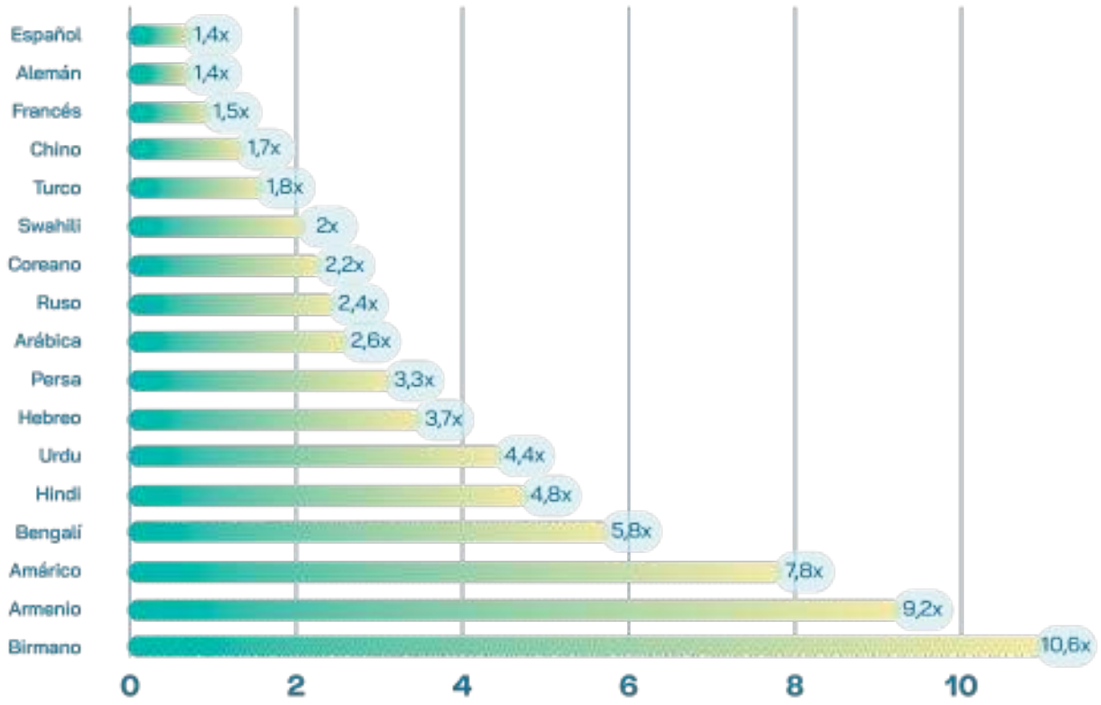
Hay dificultades a superar que son estrictamente materiales, de disponibilidad de recursos. El desarrollo de modelos de lenguaje de vanguardia requiere de la participación de expertos en inteligencia artificial, lingüística computacional, aprendizaje automático y otros campos relacionados,[29] y nuestro país sufre una escasez de programadores e ingenieros de datos, además de lingüistas y psicólogos. El porcentaje de graduados en ramas STEM afines a la IA, apenas alcanza el 11% del total de matriculados en universidades y centros públicos.[30] De hecho, ha disminuido un 14% entre 2012 y 2022, un fenómeno con apenas un par de casos similares en el conjunto de países europeos. El resultado es que, pese a los voluntariosos mensajes institucionales, no somos una potencia en IA. A finales de 2023, España sólo había desarrollado un modelo fundacional, frente a los 109 de Estados Unidos; ese año movilizó una inversión privada de 360 millones de dólares en IA (Estados Unidos, 67.220 millones; Reino Unido, 3.780; y Alemania 1.910); y había creado 21 nuevas compañías de IA (Estados Unidos, 897; China, 122; Reino Unido, 104; y Alemania, 76).[31] Además, las empresas de tecnología en lengua española son generalmente más pequeñas que las del mundo anglosajón y se orientan a funciones específicas como la traducción.

Se prevé que el mercado mundial de IA conversacional alcance los 41.400 millones de dólares en 2030, con un crecimiento anual compuesto del 23,6% entre 2022 y 2030.[32] Los chatbots y los asistentes virtuales interactivos podrían ser los grandes beneficiados de esa expansión, gracias al salto exponencial que implica la IA generativa, desde los primeros días de los sistemas basados en reglas con respuestas predefinidas.[33] La demanda podría ejercer, por consiguiente, un poderoso papel de locomotora de la innovación y el desarrollo del sector. Para empezar, no existe una IA capaz de procesar las numerosas variantes dialectales del idioma español, teniendo en cuenta circunstancias geográficas, sociales o contextuales. Desarrollarla, incluyendo las lenguas cooficiales, implicaría la creación de modelos de lenguaje de alto valor, tanto de dominio general como especializados en ámbitos de alto impacto, como la sanidad, la educación o el Derecho.

Como se ha dicho, una de las opciones pasa por evolucionar el modelo del lenguaje "MarIA",[34] el primer sistema de inteligencia artificial experto en comprender y escribir en lengua española, creado en el marco del Plan de Impulso de Tecnologías del Lenguaje Natural[35] en colaboración con el Centro Nacional de Supercomputación y la Biblioteca Nacional de España. En paralelo, un desarrollo de la IA en español requeriría también introducir un test de referencia de evaluación de comprensión del lenguaje general, similar al Superglue del inglés, y una certificación del buen uso del español en las herramientas tecnológicas y de IA. En el caso de las lenguas cooficiales, hay proyectos en marcha, como Aina, Nós y el Plan de Tecnologías del Lenguaje en euskera, entre otros, que se suman a otras iniciativas en este ámbito en los países iberoamericanos, especialmente en el contexto administrativo.

El proyecto Alia, que se desarrolla en el MareNostrum V del Barcelona Supercomputing Center (BSC) trabajará directamente en español y en las lenguas cooficiales del Estado, sin traducción. Será una infraestructura abierta, pública y transparente, entrenada con una base de datos diseñada

Para expresar el mismo sentimiento, algunos idiomas requieren hasta 10 veces más tokens



Fuente: modernmt.com

para recibir aportaciones de instituciones como universidades o colegios profesionales, que puedan ofrecer el contenido de sus propios repositorios de información. Para trabajar con las lenguas con menos recursos, como el euskera y el gallego, IBM Research planea utilizar "datos sintéticos", textos generados por otras IA destinados a enriquecer la base de datos de entrenamiento.[36] Junto a ello, la Real Academia Española se alió en 2021 para el proyecto Lengua Española e Inteligencia Artificial (LEIA) con compañías como Telefónica, Google, Amazon, Microsoft, X y Facebook. La iniciativa incluye la creación de asistentes de voz, procesadores de texto, buscadores, chatbots, sistemas de mensajería instantánea y redes sociales, siguiendo los criterios sobre buen uso del español. LEIA nació con el objetivo de ayudar a la recopilación de material basado en la diversidad de las variedades geográficas del español, la accesibilidad de las herramientas de IA y la digitalización de los fondos propios de la RAE.[37] En su nueva etapa, iniciada en primavera de 2024, ha incorporado la creación de un observatorio de neologismos, tecnicismos, términos y variaciones del español, y de herramientas de verificación ortográfica, gramatical y léxica y de respuesta a consultas lingüísticas.

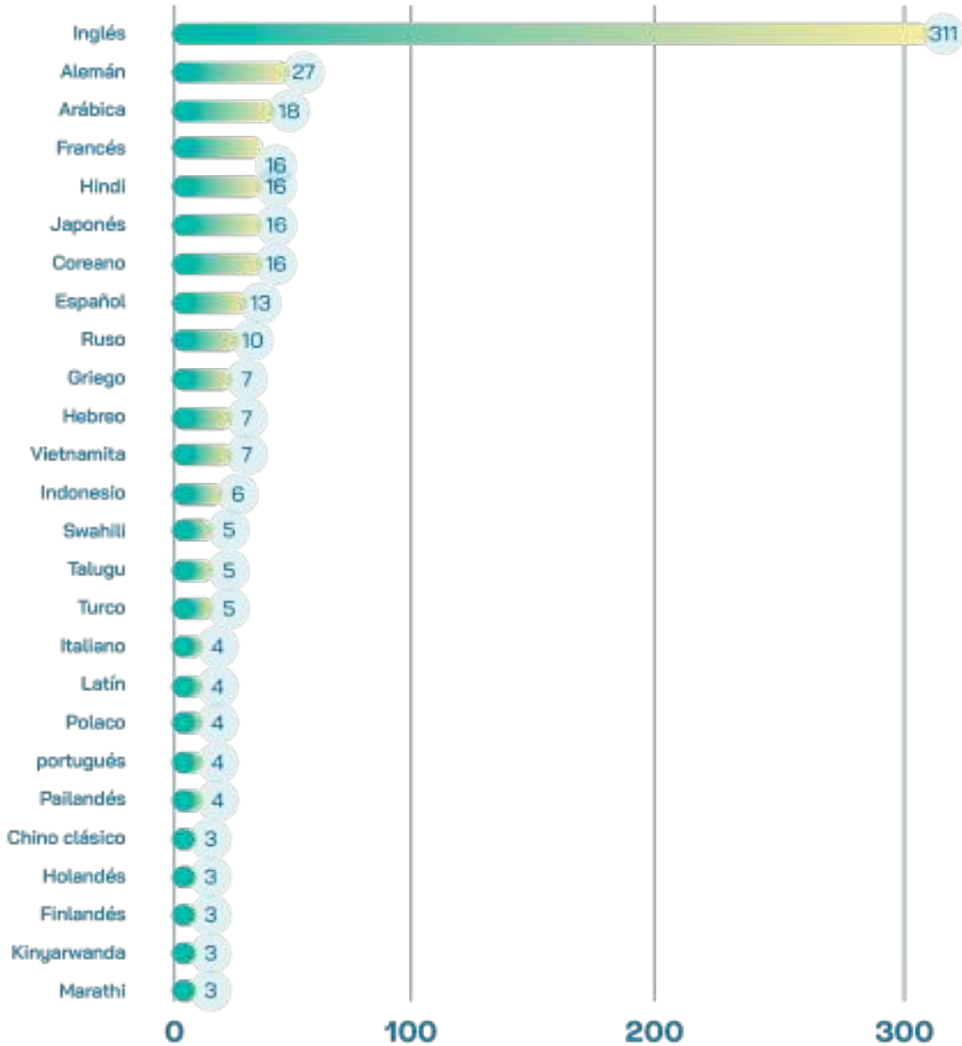
Todos estos pasos son relevantes porque la investigación científica ha demostrado que la lengua raíz de un modelo de IA sí incide en su comportamiento. Aleph Alpha, una startup de Heidelberg (Alemania), creó uno de los modelos de lenguaje de IA más potentes del mundo, capaz de hablar con fluidez inglés, alemán, francés, español e italiano, pero se descubrió que sus respuestas podían diferir de las producidas por programas similares desarrollados en Estados Unidos.[38] En inglés, la palabra "the" se usa para identificar un sustantivo específico, mientras que, en otros idiomas, como el español, el artículo definido se usa con menos frecuencia y eso complica la creación de indicaciones que funcionen en ambos idiomas. Cada lengua parte de estándares culturales diversos, hacer preguntas directas puede ser un gesto de mala o buena educación según el idioma que se use.[39] Los modelos lingüísticos entrenados en el contenido chino de internet reflejan la censura que está en el origen de esa información.[40]

La aprobación de la Ley de Inteligencia Artificial de la UE contribuirá a establecer el marco de trabajo en el futuro. La disparidad, especialmente en términos de recursos disponibles, pone en duda el estatus "agnóstico de la lengua" en los modelos actuales.[41] A finales de la pasada década, existían más de 190 corpus desarrollados para español, lenguas cooficiales y distintas variantes.[42] El Corpus del Español del Siglo XXI (CORPES XXI), impulsado por la Real Academia Española (RAE), sería el corpus de referencia, con recursos de calidad anotados y detallados.[43] El problema es su tamaño, en relación con la información digitalizada en inglés, pero al menos

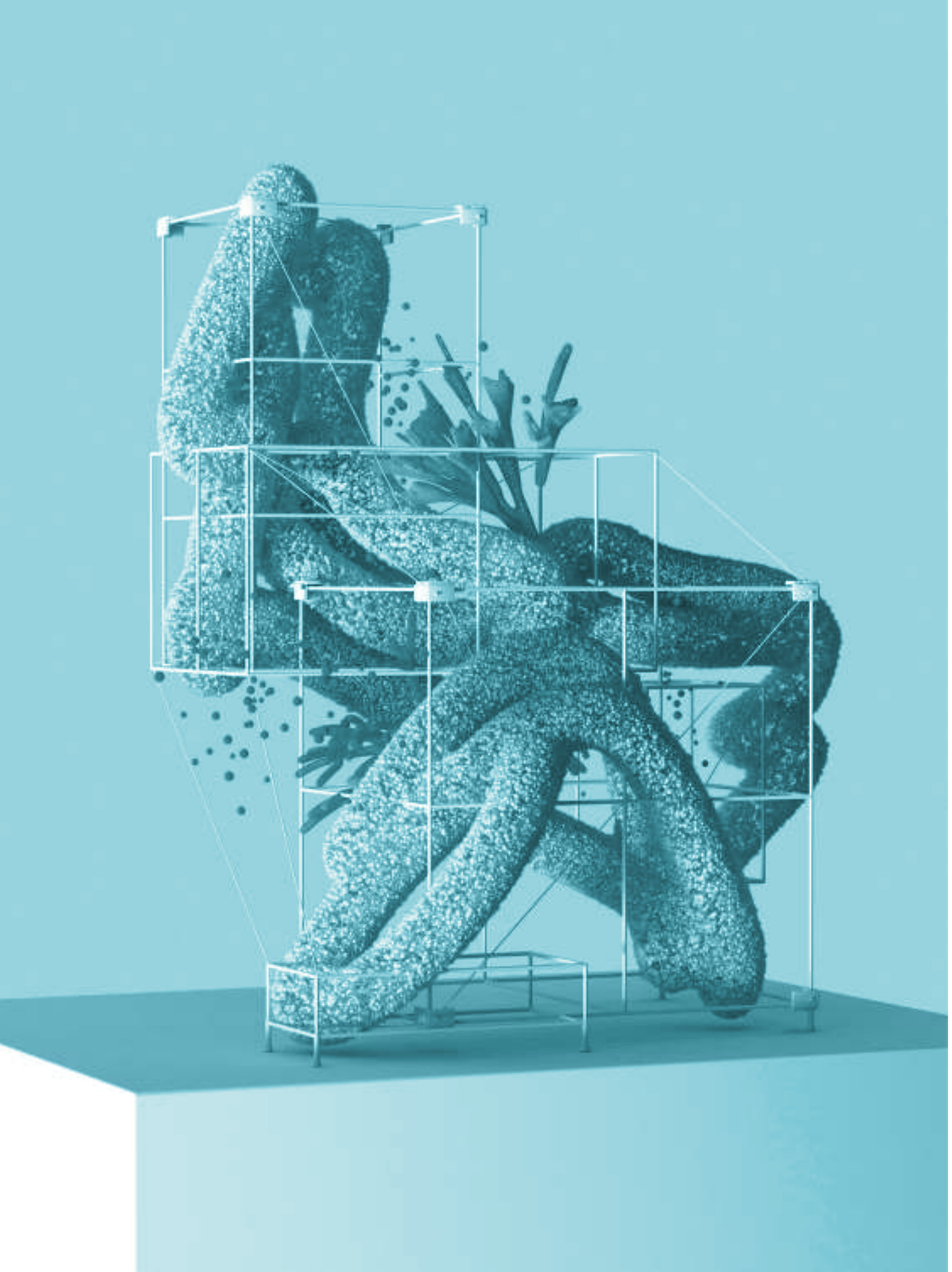
muestra un nivel de solvencia superior a la media del resto del mundo. En una auditoría manual de la calidad de 205 corpus específicos de idiomas publicados con cinco conjuntos de datos públicos principales (CCAligned, ParaCrawl,[44] WikiMatrix, OSCAR, mC4) se constató que al menos 15 de ellos no tenían texto utilizable y 87 contaban con menos de un 50% de oraciones de calidad aceptable. Muchos estaban mal etiquetados o utilizaban códigos lingüísticos no estándar o ambiguos.[45] En el caso de ParaCrawl-2, puede considerarse uno de los más avanzados, especialmente después de la inclusión de nuevos pares de lenguas: los formados por el español y las tres lenguas regionales reconocidas en el país (catalán, vasco y gallego) o las dos lenguas noruegas (bokml y nynorsk).[46]

Se estima que hay en torno a 1.000 veces más datos en inglés que en español y la desproporción se acentúa en el caso de las lenguas cooficiales. El 5,6 % del contenido en internet está en castellano, comparado con solo el 0,1% en catalán/valenciano.[47] El poder de la tecnología, sin embargo, puede compensar la diferencia de partida. Esa es la gran oportunidad para los innovadores y quienes sepan identificar la necesidad a cubrir. Pese a haber sido entrenado en inglés, un experimento demostró que, al pedírsele un titular para un artículo sobre Valencia, GPT-3 era capaz de escribir en valenciano[48] considerando las particularidades culturales implícitas en esa habla. En 2023, ChatGPT tenía una precisión promedio del 63,41% en 10 categorías de razonamiento diferentes: razonamiento lógico, razonamiento no textual y razonamiento de sentido común, lo que lo convertía en un razonador poco confiable.[49] Un año después, Open AI tradujo el punto de referencia MMLU (un conjunto de 14.000 problemas de opción múltiple que abarcan 57 temas) a 26 idiomas mediante Azure Translate: en 24 de los idiomas evaluados, superó el rendimiento en inglés de GPT-3.5 y de otros LLM (Chinchilla, PaLM), incluso en idiomas de bajos recursos como letón, galés y suajili.[50] El inglés es el idioma con mayores recursos en muchos órdenes de magnitud, pero el español, el chino, el alemán y varios idiomas más cuentan con un volumen de documentos

Principales idiomas en resúmenes de artículos publicados por la Asociación de Lingüística Computacional, mayo de 2022-enero de 2023



Fuente: modernmt.com



lo suficientemente alto como para construir modelos lingüísticos igual de sofisticados.

A nivel global, el problema no es estrictamente tecnológico, sino de visibilidad. Las comunidades con acceso limitado a Internet están subrepresentadas online, lo que distorsiona los datos textuales disponibles para entrenar herramientas de IA generativa[51] y alimenta un fenómeno conocido como la transferencia de prestigio,[52] que establece que el inglés estadounidense es el "estándar" y el modo dominante de discurso, y cualquier desviación estilística en la pronunciación o la gramática se percibe como inferior o incorrecta. La última versión, ChatGPT-4, obtuvo una puntuación del 85% en una prueba común de preguntas y respuestas en inglés, pero en telugu, un idioma indio hablado por casi 100 millones de personas, se mantuvo en el 62%.[53]

En general, el rendimiento de ChatGPT es habitualmente mejor para indicaciones en inglés, especialmente para tareas de nivel superior que requieren habilidades de razonamiento más complejas, aunque los textos de entrada estén redactados o esperen recibir la respuesta en otros idiomas. Su comportamiento empeora al responder preguntas objetivas o resumir textos complejos en idiomas distintos del inglés, en esas circunstancias es más probable que invente información. Los modelos funcionan mejor en tareas que implican pasar de un idioma X al inglés, que en tareas que implican pasar del inglés a ese idioma. En un ejercicio de abril de 2023, NewsGuard proporcionó a ChatGPT-3.5 siete mensajes en inglés, chino simplificado y chino tradicional, y le pidió que produjera noticias que promovieran narrativas de desinformación relacionadas con China. Para el ejercicio en inglés, ChatGPT se negó a presentar afirmaciones falsas en seis de siete mensajes. Sin embargo, produjo los artículos falsos en chino simplificado y en chino tradicional las siete veces.[54] Precisamente en el ámbito de la información periodística, y para solventar las dudas sobre el uso de recursos protegidos por propiedad intelectual, OpenAI ha incorporado alianzas que incluyen a la española Prisa Media, la francesa Le Monde y la alemana Axel Springer, que se suman a sus colaboraciones con American Journalism Project, para apoyar iniciativas innovadoras de noticias locales, y The Associated Press.[55]

Además del problema de la escasez de datos, hay que afrontar el incremento de costes: usar GPT-4 en idiomas distintos del inglés puede costar hasta 15 veces más, a causa de la tokenización, pese a resultar menos efectivo. Idiomas como el hindi y el bengalí, hablados por más de 800 millones de personas, presentan una longitud simbólica media que supera en aproximadamente cinco veces la del inglés, el idioma armenio la rebasa en nueve

MANUEL DE LEÓN

Hago una propuesta en dos direcciones. Por una parte, usar la IA para que el español usado en la red sea el correcto gramaticalmente evitando fragmentaciones del idioma, pero por otra, usarla para posicionar al español frente a otras lenguas competidoras como el inglés. El buen uso de la lengua por la IA se traduce también en la ética a seguir en la elaboración de algoritmos y en la que el lenguaje es esencial.

veces y el birmano en más de 10 veces. Todo eso se traduce en tokens, cuyo modelo de asignación favorece desproporcionadamente a los idiomas con escritura latina y fragmenta excesivamente a las escrituras menos representadas. Lo cual no es una cuestión menor, teniendo en cuenta que Estados Unidos solo representó el 10% del tráfico enviado a ChatGPT entre enero y marzo de 2023. Los modelos de lenguaje han pasado de ser prototipos de investigación a productos comercializados ofrecidos como API web, que cobran a sus usuarios según el uso, o por ser más precisos, por la cantidad de "tokens" procesados por los modelos de lenguaje subyacentes.[56]

Hay investigadores que sostienen que, en las actuales circunstancias, resulta más razonable construir modelos más pequeños dirigidos a satisfacer tareas específicas para problemas de PLN (procesamiento de lenguaje natural) que se pueden alojar localmente y funcionar a costes más bajos. RigoBERTa es un modelo de lenguaje en español del Instituto de Ingeniería del Conocimiento (IIC) de la Universidad Autónoma de Madrid diseñado para adaptarse a diferentes dominios del lenguaje, como legal o salud, para mejorar las aplicaciones del PLN. Está pensado para aplicarse a un nivel productivo o empresarial y no a nivel usuario como la mayoría de los modelos generativos. Curiosamente, el rendimiento de Chat GPT para idiomas de bajos y extremadamente bajos recursos en algunas tareas es, en ocasiones, mejor o comparable al de los idiomas de recursos altos o medios. Lo cual podría indicar que el tamaño de los datos podría no ser el único factor que determina su rendimiento: también influye la tarea objetivo y las similitudes y las relaciones de un idioma con respecto a otros dominantes en los datos de capacitación para LLM.

El inglés es el idioma principal de Internet con el 63,7% de los sitios web, a pesar de que solo lo habla el 16% de la población mundial. Entre los artículos científicos sobre PLN, el inglés se menciona diez veces más que el siguiente, el alemán. A medida que crece la investigación se incrementan los datos etiquetados, que pueden usarse para la calidad de los modelos, en lo que acaba siendo un círculo virtuoso para el PLN en inglés, pese a que hay otros seis idiomas que podrían considerarse de altos recursos: las lenguas idiomas oficiales de la ONU, menos el ruso y más el japonés. Hasta las empresas de tecnología son conscientes de esa situación y vienen trabajando en ampliar la cantidad de modelos de lenguaje en los que funcionan sus soluciones. Lo hacen creando más conjuntos de datos, con proyectos como No Language Left Behind de Facebook y la Iniciativa 1000 Idiomas de Google. La arquitectura del modelo BERT, de esta última compañía, uno de los más populares y baratos de entrenar, se ha utilizado para francés (CamemBERT), italiano (AlBERTo), árabe (AraBERT), holandés. (BERTje), vasco (BERTeus), maltés (BERTu) y suajili (SwahBERT), entre otros. Preocupada por las implicaciones que podría tener en la eficacia de los sistemas de defensa, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (DARPA) de Estados Unidos financió el programa Idiomas de bajos recursos para incidentes emergentes (LORELEI) en 2014.[57]

En lugar de utilizar modelos monolingües para realizar tareas de PNL, los investigadores suelen utilizar modelos de idiomas multilingües, como el mencionado mBERT de Google y XLM-R de Meta, que se entrenan a partir de textos de muchos idiomas diferentes a la vez en la misma tarea de rellenar espacios en blanco. Se entiende que pueden inferir conexiones entre idiomas y actuar así como una especie de puente entre los de altos y bajos recursos. Sin embargo, la realidad es que los modelos multilingües funcionan mediante la transferencia entre contextos lingüísticos, y a menudo eso supone que los idiomas con mayores recursos sobrescriben a los de menores recursos. El español utiliza más adjetivos y analogías que el inglés para describir situaciones extremas, por lo que un algoritmo de detección de sentimientos en inglés podría caracterizar erróneamente a un texto escrito en español.[58] Los idiomas no necesariamente se informan entre sí, son áreas superpuestas, pero distintas del conjunto de datos, y el modelo no tiene manera de comparar si ciertas frases o predicciones difieren entre esas áreas.[59] En definitiva, en cuantos más idiomas se entrena un modelo multilingüe, menos puede capturar los rasgos únicos de cualquier idioma específico. Es lo que se conoce como la maldición del multilingüismo.

Tecnología de la lengua sobre el terreno

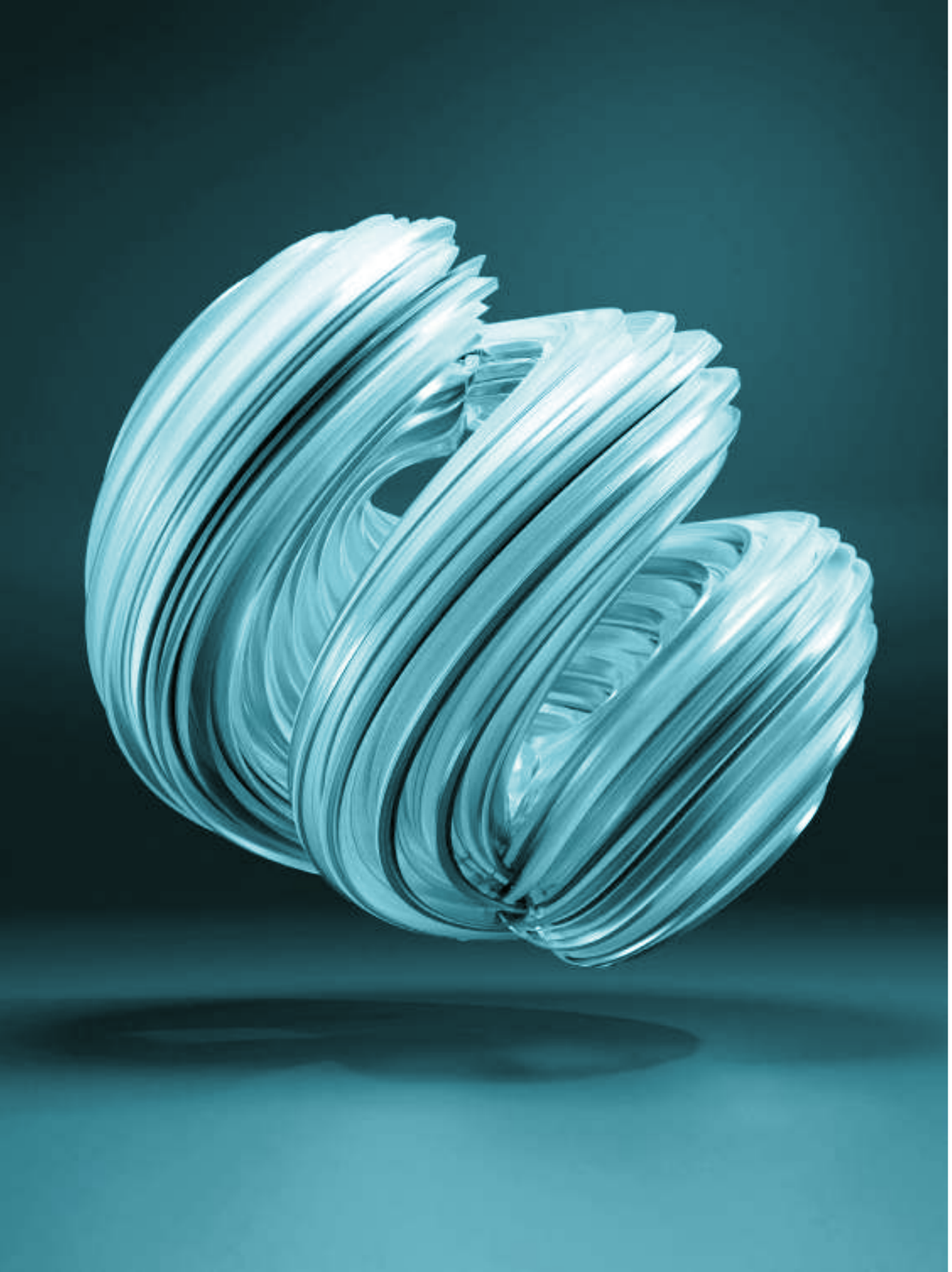
ESPAÑA

El desafío de la inteligencia artificial en español se ha abordado a lo largo de los últimos años como un reto de impulso público, al que se han sumado corporaciones tecnológicas como Telefónica e IBM como proveedoras de infraestructura de soporte y servicio de I+D, además de entidades como el Barcelona Supercomputing Center. Para el director del Instituto Cervantes, desde el ámbito de las principales instituciones culturales españolas el reto lingüístico y cultural más importante del siglo XXI es "enseñar español a las máquinas y que estas nos ayuden a enseñarlo". Desde su institución, continúa en unas reflexiones publicadas en la web del instituto, "promoveremos el diseño de sistemas de IA robustos, fiables y transparentes que prevengan un uso inapropiado o torticero de la tecnología, en especial a través de la expresión confusa, ambigua o sesgada en el lenguaje". Según Luis García Montero, "los algoritmos han de ampliar el atractivo de nuestra lengua en toda su diversidad, de la cultura panhispánica que la acompaña y de nuestras industrias comunes". En última instancia, "las máquinas usarán fórmulas, palabras, imágenes, diseños y expresiones claras utilizando todos los matices de nuestros idiomas, la importancia del contexto y la forma en la que los seres humanos nos comunicamos entre nosotros".[60] La principal medida puesta en marcha para ejercer esa gobernanza ha sido la creación del Observatorio Global del Español, que celebró la primera reunión de su comisión ejecutiva en marzo de 2024. Desde el Instituto Cervantes se espera que sirva, entre otras cosas, para determinar la forma en la que

Definición de la IA generativa

Para comprender la inteligencia artificial generativa (GenAI), primero debemos entender cómo se construye la tecnología a partir de cada una de las subcategorías que se enumeran a continuación.

Fuente: AI for Education



se debe apoyar la inteligencia artificial y el lenguaje de las máquinas para que no creen sesgos supremacistas, entre otros problemas y riesgos que entrañan.

En paralelo, el proyecto LEIA (Lengua Española e Inteligencia Artificial) entraba también en 2024 en su segunda fase,[61] bajo el liderazgo de la Real Academia Española y con la participación como socios tecnológicos de Fujitsu, que se basa en las soluciones de Amazon Web Services (AWS), y de la norteamericana VASS. No hay tecnología española, por el momento. En esta etapa se creará un observatorio de neologismos, términos y variaciones del español, una herramienta capaz de detectar automáticamente, en el universo digital y a partir de un buen número de fuentes, palabras y expresiones que no están registradas todavía en el Diccionario de la lengua española (DLE), ya sean neologismos, derivados, tecnicismos, regionalismos y extranjerismos. Por otra parte, se creará un verificador lingüístico en abierto alojado en la página de LEIA y accesible desde la web de la RAE. Permitirá a los usuarios introducir un texto para comprobar si es correcto desde un punto de vista ortográfico, gramatical y léxico. En relación con esta iniciativa, el proyecto prevé también la creación de una herramienta para dar respuesta a las dudas lingüísticas de los hispanohablantes.

La segunda fase de LEIA incluye, asimismo, la recopilación de material representativo de las distintas variedades geográficas del español, especialmente léxico y oral. Para ello, una sección interactiva permitirá aportar información en relación con imágenes, textos u otros elementos que se les muestren. La participación ciudadana, en ese sentido, será clave porque se pedirá a los usuarios que describan una imagen con su propia voz y con ello se creará un corpus oral para entrenar a los sistemas o aplicaciones en los distintos acentos. LEIA pondrá disposición pública, de manera abierta, los materiales utilizados para generar el proyecto, desde códigos fuente a datos o corpus de entrenamiento, con la intención de impulsar la industria de las tecnologías del lenguaje en español.

Relación de notas

[1] Javier Pastor. "**El año en que ChatGPT nos hizo vivir peligrosamente: su primer aniversario deja más preguntas que respuestas**". Xataka. Publicado el 30/11/2023, consultado el 23/05/2024.

[2] OpenAI (2024). "**Hello GPT-4o**". Consultado el 23/05/2024.

[3] María Marañón. "**Elena González-Blanco, la filóloga que revoluciona el mercado con IA diseñada para hispanohablantes**". Publicado el 20/06/2023, consultado el 23/05/2024.

[4] N. Chomsky. **Transactions on Information Theory**, 1956, 2, 3, 113, DOI: 10.1109/TIT.1956.1056813.

[5] Tiger Webb. "**Noam Chomsky on the unsolved mysteries of language and the brain**". ABC Listen. Publicado el 30/03/2016, consultado el 23/05/2024.

[6] Keith D. Foote. "**A Brief History of Large Language Models**". Publicado el 28/12/2023, consultado el 23/05/2024.

[7] A Vaswani et al. arXiv:1706.03762, DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762.

[8] Bernard Marr. "**A Short History Of ChatGPT: How We Got To Where We Are Today**". Forbes. Publicado el 19/05/2023, consultado el 23/05/2024.

[9] "**Microsoft-backed OpenAI valued at $80bn after company completes deal**". The Guardian. Publicado el 17/02/2024, consultado el 23/05/2024.

[10] Adam VanBuskirk. "**A Brief History of The Generative Pre-trained Transformer (GPT) Language Models**". Wordbot.io. Publicado el 31/03/2023, consultado el 23/05/2024.

[11] Noan Chomsky, Ian Roberts y Jeffrey Watumull. "**Noam Chomsky: The False Promise of ChatGPT**". The New York Times. Publicado el 08/03/2023, consultado el 23/05/2024.

[12] Unión Europea (2023). "**AI Act**". Consultado el 23/05/2024.

[13] P Koehn. "**Europarl: A Parallel Corpus for Statistical Machine Translation**". The Tenth Machine Translation Summit Proceedings of Conference. International Association for Machine Translation, 2005, pp 79-86, John Hutchins (ed). Consultado el 23/05/2024.

[14] Kevin Schauul, Szu Yu Chen y Nitasha Tiku. "**Inside the secret list of websites that make AI like ChatGPT sound smart**". Washington Post. Publicado el 19/04/2024, consultado el 23/05/2024.

[15] Ingrid Fadelli. "**Researchers examine how multilingual BERT models encode grammatical features**". TechXplore. Publicado el 22/02/2021, consultado el 23/05/2024.

[16] Gabriel Nicholas y Aliya Bhatia. "**Lost in Translation: Large Language Models in Non-English Content Analysis**". Center for Democracy and Technology. Publicado el 23/05/2023, consultado el 23/05/2024.

[17] Pipplet (2023). "**Language Preservation and Revitalization: How AI is Aiding Endangered Languages**". Consultado el 23/05/2024.

[18] Ethnologue (2023). "**What is the most spoken language?**" Consultado el 23/05/2024.

[19] Ministerio para la Transformación Digital (2021). "**PERTE: Proyectos Estratégicos para la Recuperación y Transformación Económica**". Consultado el 23/05/2024.

[20] Ministerio para la Transformación Digital (2021). "**El primer sistema masivo de Inteligencia Artificial de la lengua española, MarIA, empieza a resumir y generar textos**". Consultado el 23/05/2024.

[21] María Marañón. **"Elena González-Blanco, la filóloga que revoluciona el mercado con IA diseñada para hispanohablantes"**. Publicado el 20/06/2023, consultado el 23/05/2024.

[22] Jesús Díaz. **"Clibrain presenta LINCE, el primer modelo de lenguaje (LLM) optimizado para la IA en español"**. El programa de la publicidad. Publicado el 05/07/2023, consultado el 23/05/2024.

[23] Natasha Thomas. "**Clibrain joins the generative AI race with Lince, an LLM optimized for Spanish**". Techcrunch. Publicado el 12/07/2023, consultado el 23/05/2024.

[24] Europa Press (2024). **"El Gobierno e IBM colaboran para impulsar la agenda nacional de IA y construir modelos en español".** Consultado el 23/05/2024.

[25] CGTN (2024). **"España aprueba estrategia nacional de IA centrada en supercomputación y códigos éticos"**. Consultado el 23/05/2024.

[26] David Salces. **"El LLM español estará listo «a la vuelta de verano"**. Muy Computer. Publicado el 12/04/2024, consultado el 23/05/2024.

[27] **"Perte Nueva Economía de la Lengua. Memoria técnica"**, Gobierno de España, marzo de 2022, consultado el 02/05/2024

[28] Elena González Blanco, **"El español como lengua nativa de IA"**, IE University, 23 de abril de 2021

[29] **"Reacciones: el presidente del Gobierno anuncia el diseño de un modelo fundacional de lenguaje de inteligencia artificial entrenado en español"**, Science Media Centre España, 26 de febrero de 2024, consultado el 03/05/2024

[30] **"La inteligencia artificial en España"**, Observatorio ADEI y Google, febrero de 2020

[31] Nestor Maslej et al. ,"**The AI Index 2024 Annual Report**," AI Index Steering Committee, Institute for Human-Centered AI, Stanford University, abril de 2024.

[32] **Conversational AI Market Size, Precedence Research,** septiembre de 2023

[33] **Training Data: Its Role in Multilingual AI Performance, welocalize.com**, 8 de marzo de 2023

[34] "**Así es MarIA, la primera inteligencia artificial de la lengua española**", Gobierno de España, 22 de septiembre de 2022

[35] **https://espanadigital.gob.es/lineas-de-actuacion/plan-nacional-de-tecnologias-del-lenguaje-natural**

[36] Carlos del Castillo, **"El proyecto Alia, el 'ChatGPT español' que entrena el Gobierno: "La calidad de las respuestas va a ser mucho mejor""**, eldiario.es, 23 de abril de 2024

[37] "**La RAE, inmersa en la nueva fase del proyecto LEIA (Lengua Española e Inteligencia Artificial)**", Real Academia Española, 14 de marzo de 2024

[38] Will Knight, **"AI Can Write in English. Now It's Learning Other Languages"**, Wired, 23 de Agosto de 2021

[39] Tioluwani Oyedele, **"Addressing the Challenges in Multilingual Prompt Engineering"**, Comet, 26 de febrero de 2024

[40] Will Knight, "**How censorship can influence artificial intelligence**", Wired, 4 de febrero de 2021.

[41] Pratik Joshi et al., **"The State and Fate of Linguistic Diversity and Inclusion in the NLP World",** Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, 2020.

[42] "**Informe del estado actual de los corpus en español y lenguas cooficiales**", Gobierno de España,

16 de octubre de 2023

[43] «**Entrenamiento de IA en español y procesamiento del lenguaje natural**», Real Academia Española, 8 de julio de 2022

[44] Miquel Esplà, Mikel Forcada, Gema Ramírez-Sánchez, Hieu Hoang, "**ParaCrawl: Web-scale parallel corpora for the languages of the EU**", Proceedings of Machine Translation Summit XVII: Translator, Project and User Tracks, 2019

[45] Julia Kreutzer et al. Quality at a Glance: **An Audit of Web-Crawled Multilingual Datasets. Transactions of the Association for Computational Linguistics**, 2022. doi.org/10.1162/tacl_a_00447

[46] M. Espla-Gomis et. al. ParaCrawl: **Web-scale parallel corpora for the languages of the EU, creative commons, Proceedings of MT Summit XVII**, agosto de 2019

[47] **https://en.wikipedia.org/wiki/Languages_used_on_the_Internet**

[48] Jordi Armengol-Estapé, Ona de Gibert Bonet, Maite Melero, **On the Multilingual Capabilities of Very Large-Scale English Language** Models, 2021, doi.org/10.48550/arXiv.2108.13349 consultado el 15/04/2024

[49] Yejin Bang et al. A Multitask, Multilingual, Multimodal Evaluation of ChatGPT on Reasoning, Hallucination, and Interactivity, **Proceedings of the 13th International Joint Conference on Natural Language Processing and the 3rd Conference of the Asia-Pacific Chapter of the Association for Computational Linguistics**, 2023

[50] **Expanding Frontiers**, PwC Strategy / UK Space Agency, mayo de 2023, consultado el 27/04/2024.

[51] Nicol Tuner, **How language gaps constrain generative AI development**, Brookings, 24 de octubre de 2023, consultado el 14/05/2024

[52] Julia Nee et al. **Advancing social justice through linguistic justice: Strategies for building equity fluent NLP technology, en Equity and Access in Algorithms, Mechanisms, and Optimization** (EAAMO '21), 5–9 de octubre de 2021. doi.org/10.1145/3465416.3483301

[53] **Why AI needs to learn new languages**, The Economist, 24 de enero de 2024

[54] Macrina Wang, "**ChatGPT-3.5 Generates More Disinformation in Chinese than in English**", WatchGuard, 26 de abril de 2023

[55] "**Global news partnerships: Le Monde and Prisa Media**", OpenAI, 13 de marzo de 2024

[56] Orevaoghene Ahia et al. **Do All Languages Cost the Same? Tokenization in the Era of Commercial Language Models**, CC BY 4.0, Mayo de 2023, consultado el 14/05/2024

[57] Gabriel Nicholas, Aliya Bhatia, "**Lost in Translation Large Language Models in Non-English Content Analysis**" Center for Democracy & Technology, mayo de 2023

[58] Stadthagen-Gonzalez et al. "**Norms of valence and arousal for 14,031 Spanish words**", Behav Res, 2017, doi.org/10.3758/s13428-015-0700-2

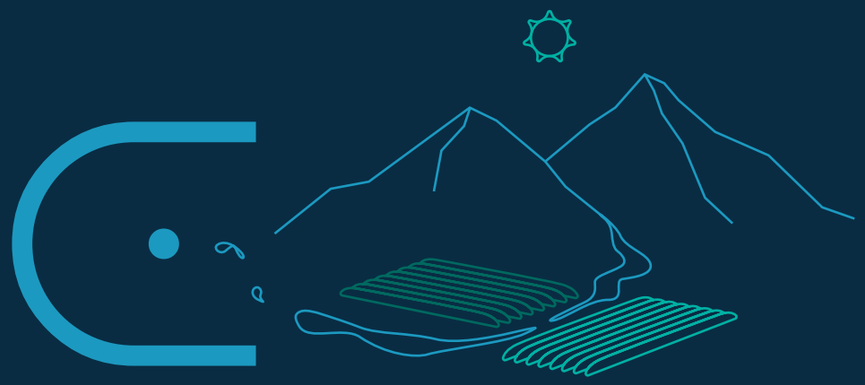
[59] Devin Coldewey, "**Why ChatGPT lies in some languages more than others"**, TechCrunch, 26 de abril de 2023

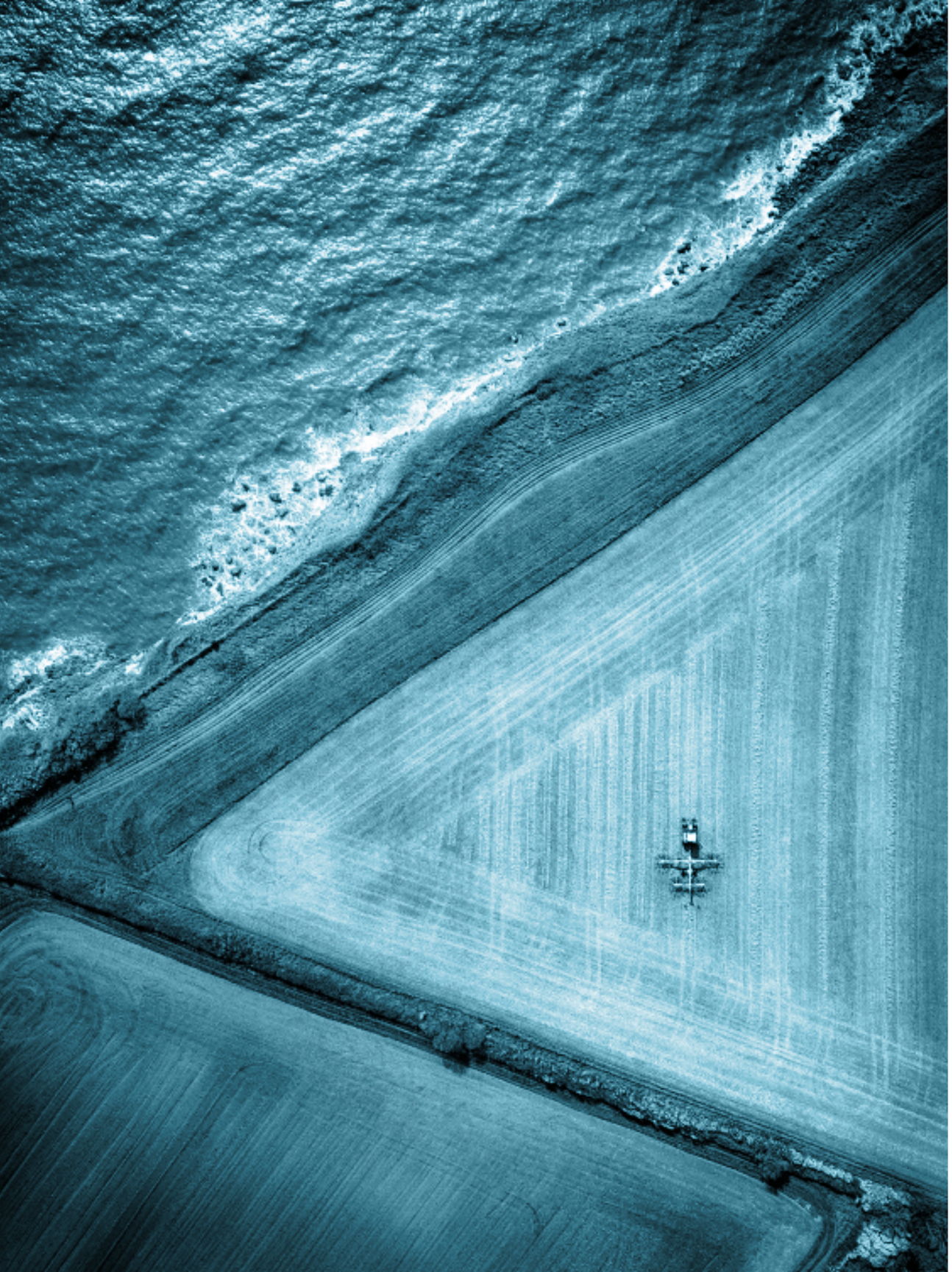
[60] Luis García Montero, "**Reflexiones precavidas sobre la inteligencia artificial**", Instituto Cervantes, 2022

[61] **https://www.rae.es/noticia/la-rae-inmersa-en-la-nueva-fase-del-proyecto-leia-lengua-espanola-e-inteligencia-artificial**

02

Una agricultura para el agua





Una agricultura para el agua

El valor estratégico del agua en España es enorme, debido a su escasez relativa en muchas regiones del país, especialmente durante la época estival y en periodos de sequía. A pesar de ser un país con una gran diversidad de fuentes de agua, incluyendo ríos, acuíferos y embalses, la distribución irregular de las precipitaciones y el aumento de la demanda, debido al crecimiento demográfico, la actividad económica y la crisis climática, han generado una situación de estrés hídrico. Por tanto, la gestión sostenible del agua se ha convertido en un desafío prioritario para garantizar la disponibilidad de este recurso vital para la naturaleza, la agricultura –que representa un 2,3% del PIB español,[1] por encima de la media europea–, y la población española. La implementación de políticas y medidas de gestión del agua, la promoción de prácticas de uso eficiente y responsable de este recurso y el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas son fundamentales para asegurar su disponibilidad a largo plazo y evitar impactos negativos sobre nuestros ecosistemas y nuestra sociedad.[2]

Nuevas fuentes tecnológicas de agua

POR DENTRO

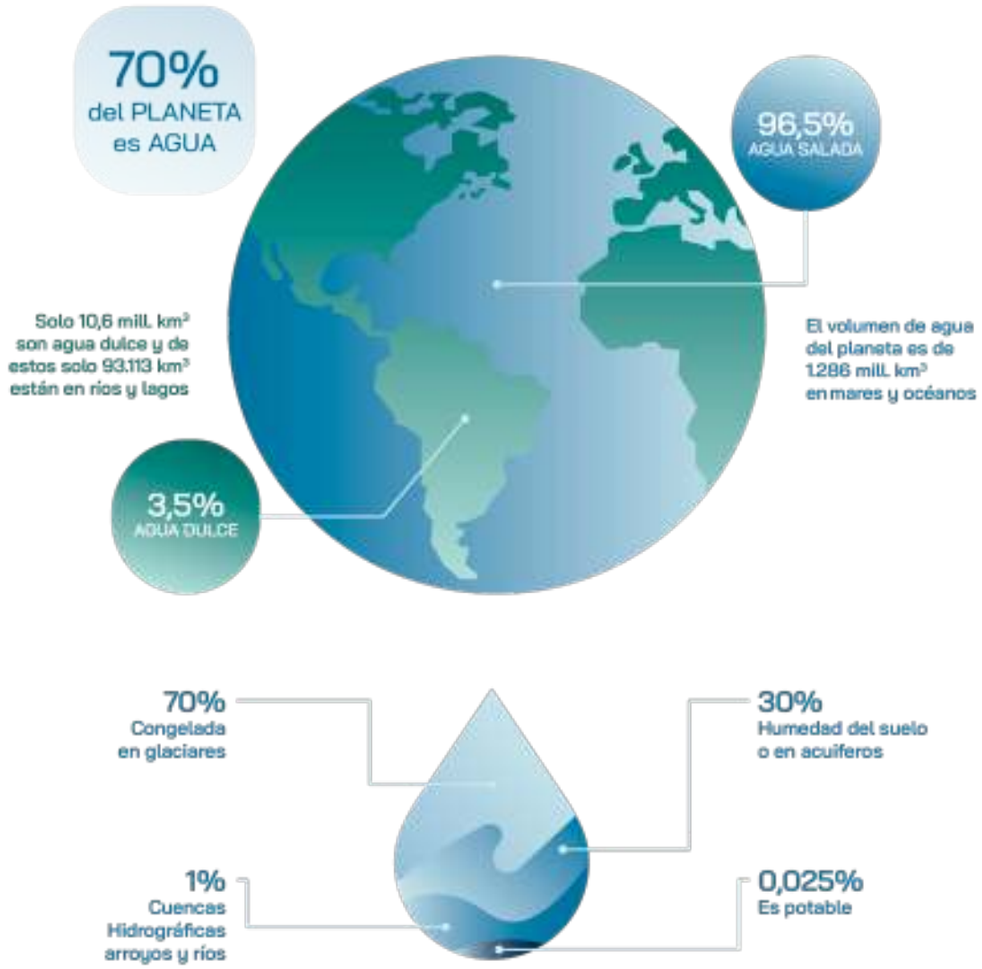
El agua es un recurso vital para la vida en la Tierra, esencial para la supervivencia de todos los organismos vivos – incluidos nosotros, los humanos. De hecho, desde hace unos años, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) reconoce el derecho al agua potable y el saneamiento como un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida.[3] Es también uno de los puntos fundamentales de la Agenda 2030 de la propia ONU, que estableció la disponibilidad y el acceso a agua potable como uno de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), anunciados en 2015.[4] El agua dulce es un elemento indispensable para la existencia de los ecosistemas terrestres y acuáticos. Además, desempeña un papel crucial en el desarrollo y bienestar de las sociedades humanas, es una sustancia fundamental para la agricultura, la industria, la generación de energía y, por supuesto, el consumo humano.

El agua ocupa, aproximadamente, el 70% de la superficie terrestre. Desde los orígenes de la vida en la Tierra, ha sido un ingrediente indispensable para la supervivencia de los seres vivos. Y, en consecuencia, es también un recurso clave para el desarrollo y el bienestar de las sociedades humanas, tanto que desde los orígenes de la vida sedentaria el agua siempre ha desempeñado un papel fundamental en la evolución socio-económica, así como en el avance de conflictos políticos y territoriales.[5] Esto se debe, sobre todo, a la escasez relativa del agua dulce. A pesar de representar un 3,5% del total del agua en el planeta, tan solo una pequeña parte del total –un 0,01%– está accesible a través de ríos y lagos – el resto está, bien congelada en los polos, bien acumulada en depósitos subterráneos. El agua dulce es, por lo tanto, un recurso limitado y muy preciado.[6] En España, la importancia del agua en la economía es especialmente relevante, debido a la dependencia de sectores clave como la agricultura, que representa una parte significativa tanto del PIB como del empleo del país. De hecho, la escasez de agua es una de las principales causas de las malas cosechas de los últimos años que, entre otras cosas, provocaron una subida sin precedentes del precio del aceite de oliva no solo en España, sino también en otros países productores de oro líquido como Portugal, Italia y Grecia.[7]

La disponibilidad de agua en España es limitada y, además, está distribuida de manera desigual a lo largo del territorio. A principios de 2024, los embalses de algunas cuencas hidrográficas del norte de España están al 70% de su capacidad, mientras que las reservas tanto del sur de la península como de Cataluña estaban por debajo del 40%. En las Islas Canarias, donde la mayor parte del agua dulce proviene de las plantas desalinizadoras, la disponibilidad es mucho más limitada.[8] Esta distribución irregular, causada por distintos patrones de precipitación y diferentes usos del agua, ha generado una situación de estrés hídrico en muchas regiones de España, que se ha visto especialmente agravada en los últimos años debido a la progresión de la crisis climática. En muchas zonas, la sobreexplotación de los recursos hídricos ha provocado la disminución de los niveles de los acuíferos, la salinización de los suelos y la degradación de los ecosistemas acuáticos. Además, la escasez de agua también afecta a otros sectores económicos, como la industria y el turismo, que dependen de un suministro fiable para su funcionamiento.[9]

La crisis climática está exacerbando estos problemas, no solo por culpa del aumento gradual de la temperatura, sino también porque provoca fenómenos extremos, como sequías e inundaciones, que afectan a la disponibilidad y calidad del agua en todo el mundo. En España, los efectos del cambio climático son cada vez más evidentes: han aumentado las sequías en frecuencia e intensidad, mientras que las precipitaciones intensas provocan destrozos en otras regiones. Estos problemas afectan directamente a la economía española. Quizás uno de los ejemplos más mediáticos sea la deshidratación de los viñedos catalanes, que ha provocado una merma en la producción de vinos y cavas sin precedentes en esta región.[10] En abril de 2024, una de las bodegas más grandes y famosas de la zona, Freixenet, presentó un ERTE para 615 de sus empleados, casi la mitad de la plantilla, por los impactos de la sequía.[11] La crisis climática representa un desafío adicional para la gestión del agua en España, que va a requerir nuevas medidas de adaptación y mitigación para garantizar la disponibilidad y calidad del agua en el futuro.

¿Cuánta agua hay en la Tierra? ¿Y cuánta es apta para el consumo?



Fuente: Fundación Aquae

En este contexto, la gestión sostenible del agua se ha convertido en una prioridad tanto para España como para otros países afectados por la escasez y la sequía. Se necesitan políticas y medidas efectivas para promover un uso más eficiente y responsable del agua, así como para fomentar las estrategias de recuperación y reutilización, tanto para salvaguardar el consumo, como para proteger y restaurar los ecosistemas acuáticos y las fuentes de agua dulce. Probablemente, será necesario invertir en nuevas infraestructuras de almacenamiento y distribución de agua, así como en nuevas soluciones tecnológicas para el mejor aprovechamiento de los recursos hídricos, incluidas técnicas de desalinización y reutilización del agua.

Según un informe publicado recientemente por la consultora PwC, el sector del agua en España ha experimentado una fuerte transformación durante los últimos veinte años -un cambio necesario en unas infraestructuras que, en su mayoría, tienen su origen en unas planificaciones desactualizadas, consecuencia directa de la época franquista.[12] Por suerte, gracias a la denominada "nueva cultura del agua" y los esfuerzos, tanto públicos como privados, se han logrado importantes avances como la mejora del saneamiento de las aguas residuales o el desarrollo de métodos eficaces para reutilización del agua.[13] Sin embargo, muchos de estos pasos adelante son insuficientes para abordar los importantes retos a los que se enfrenta el sector -incluida la adaptación a la crisis climática. En este sentido, el Ministerio para la Transición Ecológica planteó una serie de políticas estratégicas para la mejor gestión del agua en el contexto del cambio climático. Como parte de este plan estratégico se creó el llamado Libro Verde de la Gobernanza del Agua, en colaboración con diferentes instituciones y empresas interesadas, para avanzar hacia modelos más eficientes, preparados para hacer frente a desafíos actuales y futuros.

En cuanto a la gobernanza del agua en España, destaca el valor de potenciar la colaboración con el sector empresarial. En conjunto con el ICEX y las principales asociaciones empresariales, la Dirección General del Agua ha desarrollado un catálogo de servicios relacionados con el agua que ofrecen las empresas españolas. Este catálogo tiene como objetivo mostrar a nivel internacional el potencial de las empresas españolas para ofrecer soluciones efectivas y eficientes a los desafíos relacionados con el agua que enfrentamos en el futuro.[14] En el pasado, solían priorizarse enfoques centrados en aumentar la oferta y el volumen de agua suministrada, pero, con el paso del tiempo, se han implementado nuevas políticas que enfatizan el control de la demanda. Cada vez ganan más relevancia los enfoques de economía circular, en línea con los compromisos internacionales sobre cambio climático y los ODS.[15] Por ello, el Gobierno ha redefinido las líneas estratégicas del Ministerio para priorizar la disponi-

JAVIER GARCÍA

Las nuevas tecnologías ofrecen soluciones clave para mejorar la gestión del agua en España, un país que enfrenta retos significativos debido a la sequía y la distribución desigual de recursos hídricos. Innovaciones como sensores inteligentes, imágenes satelitales y el internet de las cosas (IoT) permiten una monitorización más precisa de los sistemas de abastecimiento y distribución, optimizando el uso del agua en sectores agrícolas, industriales y urbanos. (...)

bilidad y la calidad del agua, en primer lugar para las personas, pero también para garantizar la estabilidad de las principales actividades económicas del país. En general, se busca avanzar hacia la seguridad hídrica, adaptarse al cambio climático y proteger los ecosistemas y la biodiversidad. Para lograrlo, se propone fortalecer la Administración pública, mejorar la coordinación entre políticas sectoriales, aumentar la transparencia, promover la cooperación ciudadana y la corresponsabilidad.[16]

En definitiva, la seguridad hídrica se ha convertido en una cuestión crucial para el desarrollo sostenible y el bienestar de las sociedades en todo el mundo. Según la UNESCO, los problemas relacionados con el acceso al agua potable amenazan la paz mundial y afectan, especialmente, a las poblaciones más empobrecidas y a las personas más vulnerables, como migrantes, mujeres y niñas. Por lo tanto, abordar este desafío de manera efectiva requiere una acción conjunta y coordinada que involucre a gobiernos, empresas, la comunidad científica y la sociedad. En España, como hemos visto, la situación hídrica presenta características particulares que la convierten en un caso especialmente delicado. Nos encontramos en una zona –y un momento– de estrés hídrico estructural, con una distribución desigual de los recursos y una alta dependencia de las precipitaciones. Sin embargo, frente a estos desafíos, también surgen oportunidades para gestionar el agua de manera más sostenible y resiliente. La reutilización y regeneración del agua, mediante diversas tecnologías y proyectos innovadores, se presentan como alternativas viables para reducir la presión sobre los recursos hídricos naturales.[17]

El avance de la crisis climática –la subida de las temperaturas, el aumento de los eventos extremos, los movimientos migratorios– está muy relacionado con el acceso al agua. El cambio climático, sobre todo, aumenta la variabilidad y la imprevisibilidad del ciclo del agua, lo que no solo disminuye la calidad y cantidad de agua disponible sino que, además, dificulta la previsión para la organización y distribución de los recursos hídricos.[18] España es, además, el país más árido de Europa y, aunque ha reducido su consumo de agua un 15% en los últimos diez años, todavía es necesaria una adaptación mayor para tratar de mitigar los efectos de las subidas de temperatura.[19] En este sentido, entran en juego la recuperación y la reutilización del agua, así como las tecnologías de desalación, que ya son claves hoy en día en regiones insulares. De hecho, son precisamente las Canarias y las Baleares las que concentran el 80% de estas soluciones de reutilización y aprovechamiento, y todavía no son predominantes en zonas costeras, que también podrían beneficiarse de estas soluciones sostenibles y, sobre todo, necesarias.

Además de los avances tecnológicos, que veremos más adelante, son imprescindibles los regulatorios, de forma que pueda impulsarse la creación de nuevas plantas diseñadas para abastecer no solo el consumo humano, sino también sectores como la agricultura y la industria, que podrían enfrentarse a grandes problemas en el futuro cercano. España se sitúa en la quinta posición a nivel mundial en capacidad instalada tanto en desalación como en reutilización del agua, definitivamente un ejemplo a seguir. A pesar de esto, los expertos consideran que necesitamos más inversión y desarrollo en este campo, además de empezar a concienciar a la población general sobre la importancia de nuestra "huella hídrica", quizás más importante que la famosa huella de carbono, especialmente cuando ya hemos empezado a ver los efectos devastadores de la sequía en la agricultura y, por ende, en la economía.[20] Acciones como la diversificación de fuentes de agua, la mejora de la eficiencia en el uso y la implementación de sistemas de alerta temprana para eventos hidrológicos extremos son fundamentales para garantizar la disponibilidad y calidad del agua en un contexto de cambio climático. Para adaptarnos a estos cambios, necesitamos implementar estrategias a nivel nacional e internacional que permitan optimizar la gestión del agua, desde la planificación y el uso eficiente hasta la implementación de infraestructuras resilientes.[21]

Muchas de las soluciones de desalación, recuperación y reutilización de agua son fundamentales para la adaptación al futuro del clima, pero en muchos casos son insuficientes. Sin llegar a caer en el tecnooptimismo[22] –necesitamos mucho más que simples soluciones técnicas a los problemas que plantea la crisis climática–, existen ciertos avances que podrían ayudarnos a gestionar mejor los recursos hídricos, a través de herramientas que permiten medir la calidad del agua, detectar fugas y, sobre todo, tomar decisiones en tiempo real. El Gobierno central ha impulsado el PERTE –proyecto estratégico para la recuperación y transformación económica– de Digitalización del Ciclo del Agua, que tiene como objetivo mejorar la eficiencia en la gestión de los recursos hídricos, reducir las

JAVIER GARCÍA

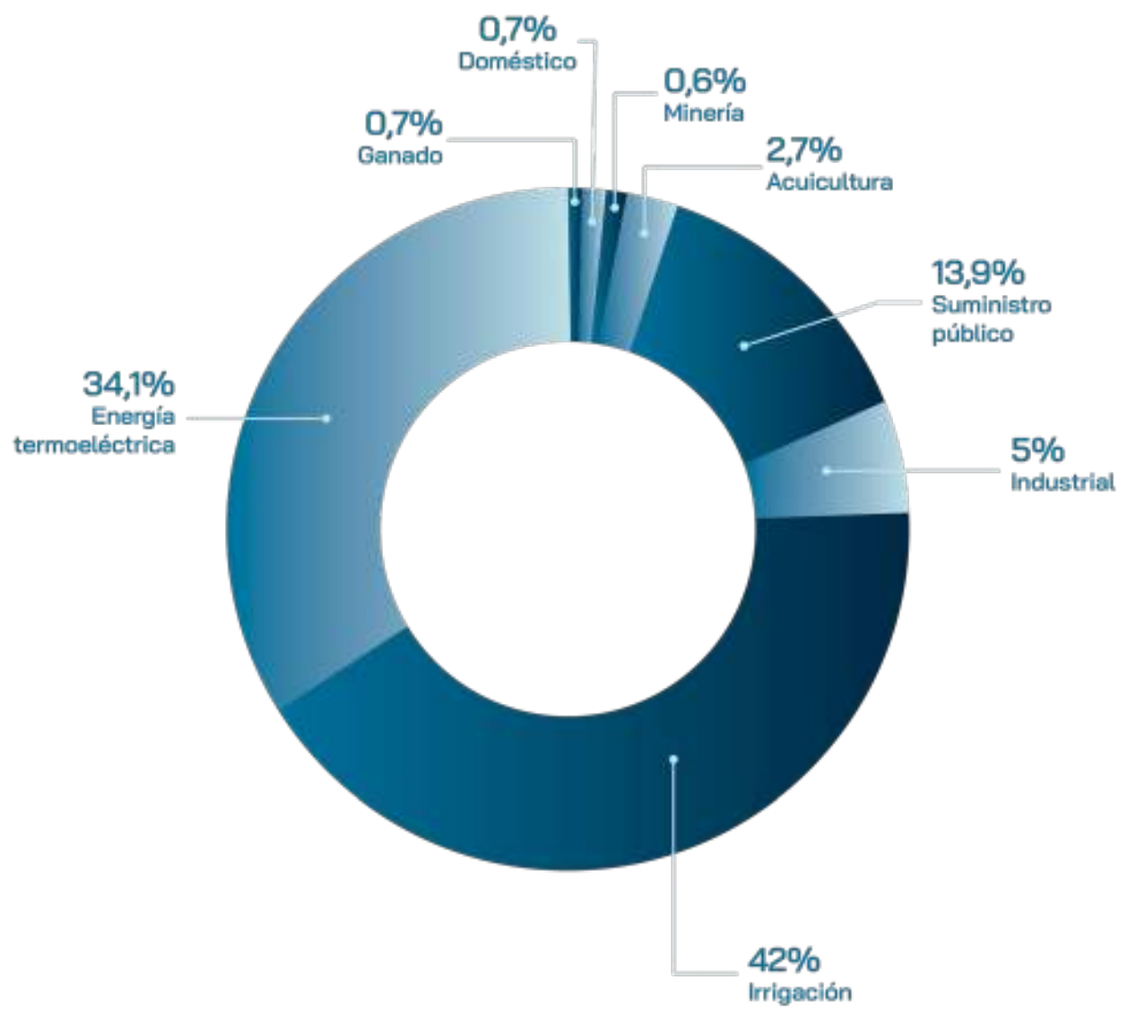
(...) Además, las tecnologías avanzadas de tratamiento de agua, como la desalación con energía renovable y la reutilización de aguas residuales, contribuyen a asegurar un suministro sostenible. Estas herramientas no solo mejoran la eficiencia, sino que también permiten una gestión más racional y efectiva que nos permita hacer frente a las consecuencias del cambio climático.

pérdidas y avanzar en el cumplimiento de los objetivos de la Unión Europea y la ONU en temas de planificación hidrológica. Este plan cuenta con más de 3.000 millones de euros de inversión total, distribuida en áreas como la digitalización del regadío y mejores programas de seguimiento y control de los vertidos.[23]

En estas estrategias, entran en juego varias tecnologías que hemos destacado en diferentes ediciones de este informe, como el internet de las cosas, el big data y la inteligencia artificial, entre otras. El internet de las cosas y las redes de alta velocidad como el 5G proporcionan una fuente inagotable de datos en tiempo real sobre la calidad del agua, nivel, presión y otros parámetros relevantes, que se obtienen, se analizan y se cotejan gracias a sensores interconectados. Esta información, transmitida y procesada, permite una monitorización y un control preciso de los sistemas hídricos, facilitando la detección temprana de problemas y la toma de decisiones. En esta segunda fase de análisis y toma de decisiones, intervienen las tecnologías de big data y, cada vez más, de inteligencia artificial. Combinadas, estas dos soluciones permiten procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real para analizar patrones, tendencias y anomalías en la calidad del agua, el caudal, los niveles o el consumo energético de las instalaciones. Además, la inteligencia artificial puede ayudar a predecir datos de demanda –optimizando la distribución y reduciendo el desperdicio–, identificar puntos y zonas de alto consumo –probablemente relacionados con usos abusivos de los recursos o posibles fugas– y crear nuevos modelos y simulaciones para mejorar la predicción de posibles escenarios.

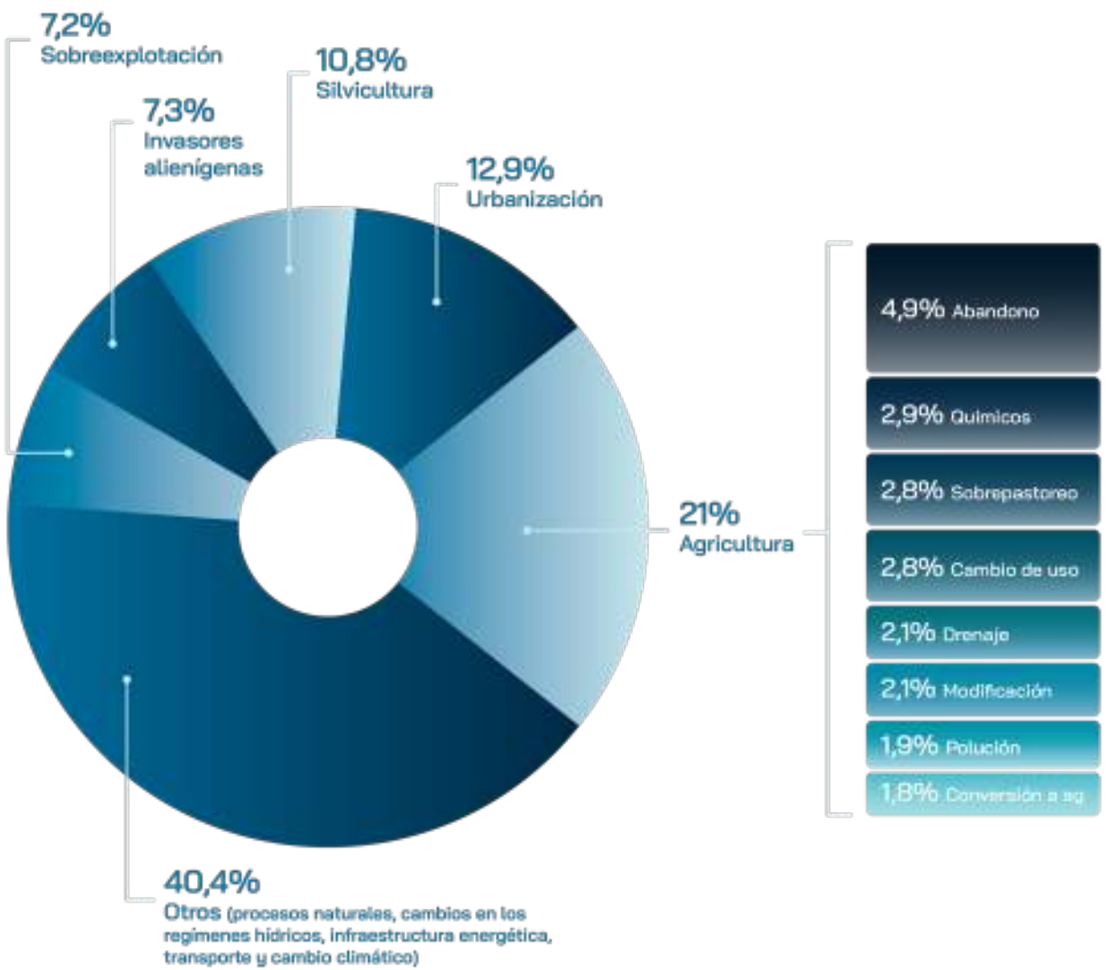
Otra tecnología, quizás algo menos conocida, que puede contribuir a una mejor utilización de los recursos hídricos –y, también, a una mejor predicción de la utilización del agua– son los llamados "gemelos digitales". Estos son modelos digitales que simulan, de manera virtual, un sistema real, en este caso, una planta industrial o una cuenca hidrográfica, por ejemplo. Los gemelos digitales permiten analizar el

Extracción de agua dulce por categoría de uso del agua



Fuente: NAWI

Presiones sobre la biodiversidad en la Unión Europea



Fuente: Sundseth / OCDE

comportamiento de estos sistemas en diferentes condiciones, simulando cambios y situaciones de estrés antes de que ocurran realmente. Su utilización en el diseño de nuevas plantas y nuevos planes de gestión del agua podría facilitar la optimización de procesos, el testeo de sistemas de control y la formación de operadores.[24]

La tecnología espacial, como los satélites y las megaconstelaciones, pueden contribuir también a mejorar la gestión del agua. Los satélites han revolucionado nuestra comprensión del ciclo del agua, gracias a su perspectiva única desde el espacio. No solo nos permiten medir y monitorizar la forma de los cuerpos de agua dulce y el avance de las sequías a través de imágenes de alta resolución, sino que además pueden combinar estos resultados con datos de diferentes sensores que proporcionan información sobre la humedad del suelo, el nivel de las aguas subterráneas, la temperatura y muchos más factores.[25] Un ejemplo exitoso es SMOS, un satélite de la ESA con una importante contribución de científicos españoles, diseñado para medir no solo la humedad del suelo sino también la salinidad del agua, para entender mejor el ciclo del agua y poder mejorar los modelos predictivos.[26] En definitiva, la integración de estas tecnologías disruptivas en la gestión del agua abre un mundo de posibilidades para optimizar el uso de este recurso vital, garantizar su calidad y seguridad, y enfrentar de manera más efectiva los desafíos relacionados con el cambio climático y la escasez de agua.

La transición hacia un nuevo modelo de gestión del agua, además de garantizar el acceso a este recurso vital, también aportaría importantes beneficios económicos y sociales. Se espera que los nuevos modelos regulatorios, más sólidos y precisos, generen confianza entre los inversores y estimulen la participación del sector privado. Esta llegada de capital al sector del agua podría destinarse, como consecuencia, a la modernización de infraestructuras, la implementación de nuevas tecnologías y la mejora de la eficiencia en la gestión, estrategias que crearían nuevos puestos de trabajo, tanto en la construcción y mantenimiento de infraestructuras como en la gestión de los recursos hídricos.[27]

Water-Smart Society

Fuente: Water Europe

Water Europe ha desarrollado un modelo para presentar los diferentes elementos que intervienen en el cambio de paradigma hacia una sociedad inteligente en materia de agua. Este modelo incluye tres objetivos clave que sustentan el valor del agua:

1. Seguridad hídrica: salvaguardar el acceso sostenible a cantidades suficientes de agua asequible y adecuada para el uso previsto, con el fin de preservar la salud de la población y los ecosistemas, fomentar el desarrollo socioeconómico de la sociedad y garantizar su protección frente a los desastres relacionados con el agua, como los derivados del cambio climático.

2. Sostenibilidad hídrica: garantizar una infraestructura, una gestión y un uso del agua que sean sostenibles económica y ambientalmente, de forma que satisfagan las necesidades ecológicas, sociales y económicas actuales, sin comprometer la capacidad de satisfacer estas necesidades en el futuro.

3. Resiliencia hídrica: lograr la resiliencia a largo plazo, de modo que los sistemas hídricos naturales y antropogénicos puedan soportar fenómenos disruptivos inesperados, evitando consecuencias graves, como sequías e inundaciones, al tiempo que se garantiza la fiabilidad del sistema hídrico.

Cinco conceptos de innovación:

1. Agua circular: minimiza las pérdidas de agua, captura y explota el valor del agua y fomenta la seguridad hídrica, la sostenibilidad y la resiliencia.

2. Aguas múltiples: el modelo incorpora una amplia gama de fuentes y calidades de agua (aguas subterráneas y superficiales, agua de lluvia, agua salobre, salmuera, aguas grises, aguas negras, agua reciclada) en un sistema de agua seguro, resiliente y sostenible.

3. Agua digital: aprovechamiento de los beneficios de la interconectividad extrema de personas, dispositivos y procesos, y creación de redes capilares capaces de monitorear el sistema de agua, comenzando por sus múltiples fuentes hasta el usuario final individual, generando así flujos continuos de datos valiosos para sistemas innovadores de apoyo a la toma de decisiones en diferentes niveles de gobernanza.

4. Agua inclusiva: establecimiento de un sistema de agua cuya gobernanza equilibre los intereses de todas las partes interesadas en su diseño, gestión y mantenimiento.

5. Agua resiliente: creación de un sistema híbrido de agua gris y verde resiliente y confiable, diseñado para soportar choques externos e internos severos, como inundaciones y sequías inducidas por el cambio climático, sin comprometer las funciones esenciales.

Abrir el grifo de los datos agrícolas

EN ACCIÓN

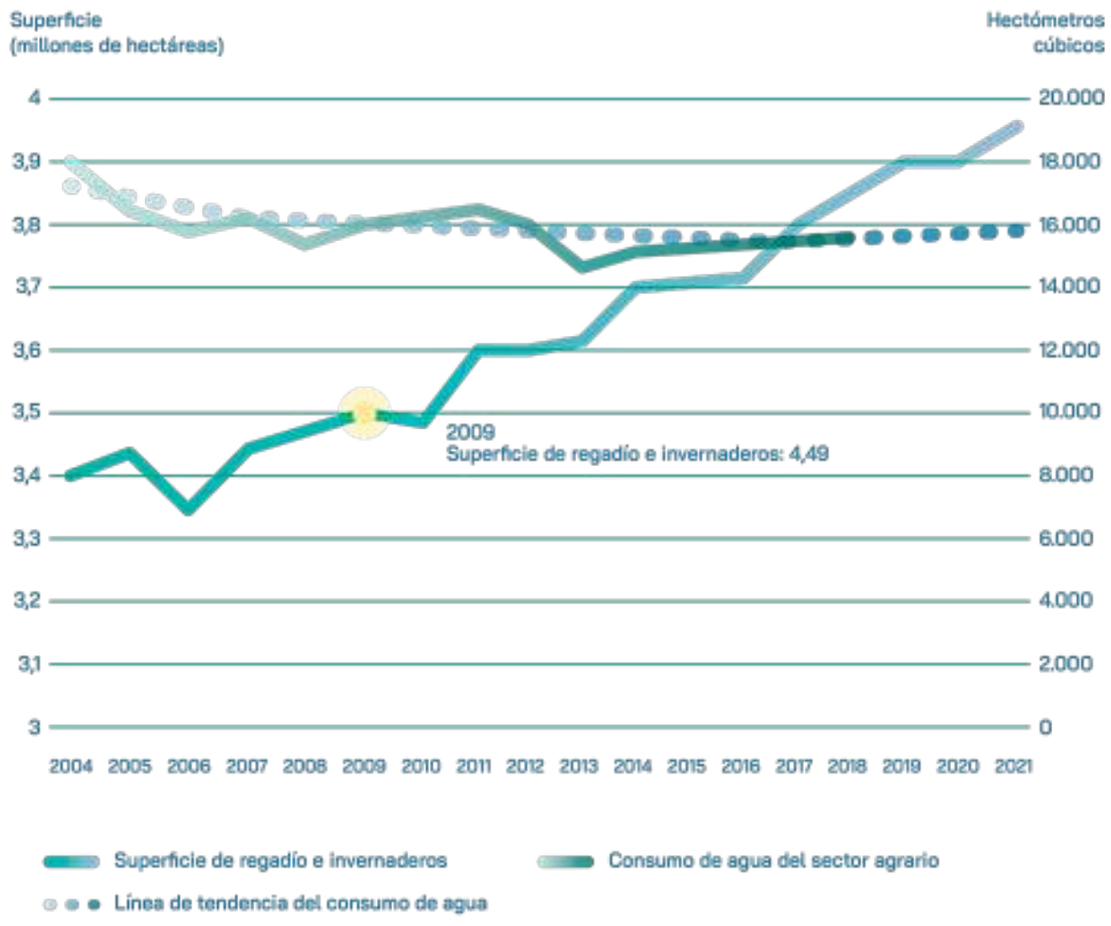
La Unión Europea impulsa con su presupuesto a sectores de base científico-tecnológica que saben exprimir la productividad de cada gota de agua como materia prima. Los 43.000 millones de euros para la Ley Europea de Chips tienen presente que cada circuito integrado en una oblea de 30 cm requiere de 8.300 litros de agua; los 235.000 millones de euros para tecnología digital previstos hasta 2027, asumen que hoy en día un centro de datos de utiliza 25,5 millones de litros de agua al año por cada MW de energía eléctrica que consume; y cuando Europa invierte 130.000 millones de euros en proyectos de hidrógeno, es consciente de que cada kilogramo de hidrógeno producido requiere nueve de agua desmineralizada[28]. La asignatura pendiente consiste en encontrar una vía para que el sector agroalimentario, responsable del consumo del 70% de los recursos hídricos del continente (el 80% en el caso de España), actúe con niveles similares de productividad. Y dado que la brecha entre suministro y demanda puede alcanzar el 56% en 2030[29], el problema que se puede generar si el sector primario no deshace el nudo gordiano va más allá de la preocupante cuestión alimentaria.

Tanto las resoluciones del Consejo Europeo de 2021 y 2023, como las llamadas de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua y la Iniciativa de Resiliencia del Agua, anunciada en el discurso sobre el Estado de la Unión en septiembre de 2023[30], trasladan el mensaje de voluntad de liderazgo de Europa. Las urgencias son evidentes. Las proyecciones más extremas de descenso de la irrigación en el futuro incluyen pérdidas de cosechas de maíz de hasta el 80% en países como Bulgaria, Grecia, Portugal y España, donde podría dejar de ser viable su producción. En el Norte de Europa, podrían incrementarse los rendimientos de las explotaciones de trigo, un cultivo de secano, en alrededor del 5%, debido a los cambios en el régimen de precipitaciones que se avecinan, combinados con un ciclo de crecimiento anticipado y mayor debido al aumento de las concentraciones de CO 2; por el contrario, en el sur de Europa los rendimientos del trigo podrían caer de media un 12%[31]. Para combatir este panorama incierto con innovación científico-tecnológica, la UE ha diseñado un modelo de Sistema de Conocimiento e Innovación Agrícola (AKIS), pero sus buenas intenciones han desembocado en una amalgama de 27 AKIS nacionales con sus AKIS regionales.

En un severo repaso de la OCDE a la eficacia de las medidas impulsadas por Bruselas, se cita que la Directiva Marco del Agua de 2000 no ha logrado su objetivo original de restaurar todas las superficies y masas de agua a un estado aceptable en 2015 y es un desafío que lo haya logrado en 2027. La Directiva sobre nitratos lleva más de 30 años en vigor, pero los excedentes de nitrógeno procedentes de la agricultura siguen afectando a la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Resulta difícil evaluar los beneficios de la Directiva sobre el Uso Sostenible de Plaguicidas de 2009 cuando aparece sobre la mesa una nueva propuesta de Reglamento sobre el uso sostenible de productos fitosanitarios para corregirla y conectar con los objetivos del Pacto Verde Europeo (EGD).

En Estados Unidos, el sector agroalimentario utiliza casi 280 millones de metros cúbicos de agua al día para regar más de 200.000 granjas, que en sus Estados occidentales consumen el 84% de los recursos disponibles. El procesamiento de carne y lácteos consume 2.300 millones de litros al día, lo que abre una interesante vía para ser una fuente de agua reciclada[32]. En efecto, el aumento de la competencia por el suministro de agua entre la agricultura, la industria y el abastecimiento a la población ha empujado al sector agrícola de EEUU hacia las fuentes no tradicionales, como las aguas pluviales, los acuíferos salobres y las aguas residuales municipales e industriales. El uso sostenible de estos recursos exige, no obstante, la eliminación de salinidad, contenido orgánico y de componentes nocivos en los procesos destinados al tratamiento de agua a granel. Estas sustancias deben someterse a una separación de precisión: metales pesados, el aceite y la grasa y los iones específicos de boro y selenio deben ser eliminados[33]. La Inflation Reduction Act (IRA) incluyó 20.000 millones de dólares para que el Departamento de Agricultura de Estados Unidos incentive la introducción de prácticas agrícolas sostenibles que permitan reducir las emisiones de metano, aumentar la captura de carbono y optimizar el uso de insumos agrícolas, entre ellos el agua.

La superficie de regadío ha aumentado notablemente en España, pero el volumen de agua usado ha permanecido relativamente estable gracias a la modernización del regadío.



Fuente: Caixabank Research, a partir de datos del INE (Euasa) y del MAPA (ESYRCE).

El sector primario y su capacidad para gestionar el agua está en el centro de todos los focos cuando se aborda el desafío de la alimentación. Las cifras del hambre a nivel global se estancaron entre 2021 y 2022, pero más de 122 millones de personas han pasado a sufrirlo desde 2019 debido a la pandemia, los episodios derivados de la crisis climática y el impacto de conflictos como la guerra en Ucrania. En 2050, se proyecta que el 70% de la población mundial resida en ciudades, lo que va a requerir una reorientación de los sistemas alimentarios para atender a estas nuevas poblaciones urbanas[34]. El aumento de precios de los alimentos y la disminución de la productividad de los cultivos constituyen un desafío estratégico. Emiratos Árabes Unidos y Estados Unidos lanzaron una iniciativa conjunta, AIM for Climate[35], a la que se han sumado multitud de países, entre ellos España, para aumentar la inversión y apoyar la innovación en sistemas alimentarios climáticamente inteligentes. En 2022, varias instituciones financieras internacionales (IFI) publicaron el "Plan de acción para abordar la inseguridad alimentaria"[36] y el G7 comprometió 4.500 millones de dólares para garantizar la seguridad alimentaria en todo el mundo[37].

Las estrategias de modernización tecnológica deberían ir acompañadas de otras políticas para controlar la demanda de agua, limitar las extracciones o controlar el área irrigada, porque la innovación está abriendo la puerta a nuevos métodos, pero lo hace todavía de forma lenta e irregular en todo el planeta. El 85% de los 242 millones de hectáreas de campos irrigados del mundo utilizan todavía riego por inundación, un método creado hace 5.000 años en el que aproximadamente la mitad del agua se pierde por evaporación. Avanza la opción del riego por pivote central, mediante aspersores, pero requiere de un alto desembolso de capital inicial y consume cantidades elevadas de energía, de modo que sólo se encuentra instalado en alrededor del 12% de la agricultura irrigada a nivel mundial. En cuanto al riego por goteo presurizado, aumenta la precisión y la eficiencia, pero utiliza también mucha energía para filtrar el agua y distribuirla por el campo. Exige una alta inversión de capital inicial y tiene altos costes de mantenimiento, por lo que generalmente solo se usa en cultivos de alto valor. De hecho, sólo está instalado en el 3% de las tierras agrícolas irrigadas del mundo.

Gana enteros la propuesta de la microirrigación por gravedad, a la que se atribuye una capacidad revolucionaria para abordar el desafío de la escasez de agua. Utiliza únicamente la infraestructura impulsada por gravedad de un campo irrigado por inundación y distribuye el agua a través de tuberías de riego por goteo. Demanda la mitad de suministro y de fertilizantes contaminantes que se utilizan actualmente en los campos regados por inundación y tiene un precio rentable incluso para cultivos básicos como maíz, algodón, alfalfa, patatas, caña de azúcar y arroz. Por su propia configuración, puede ser una solución ideal para reducir significativamente los gases de efecto invernadero

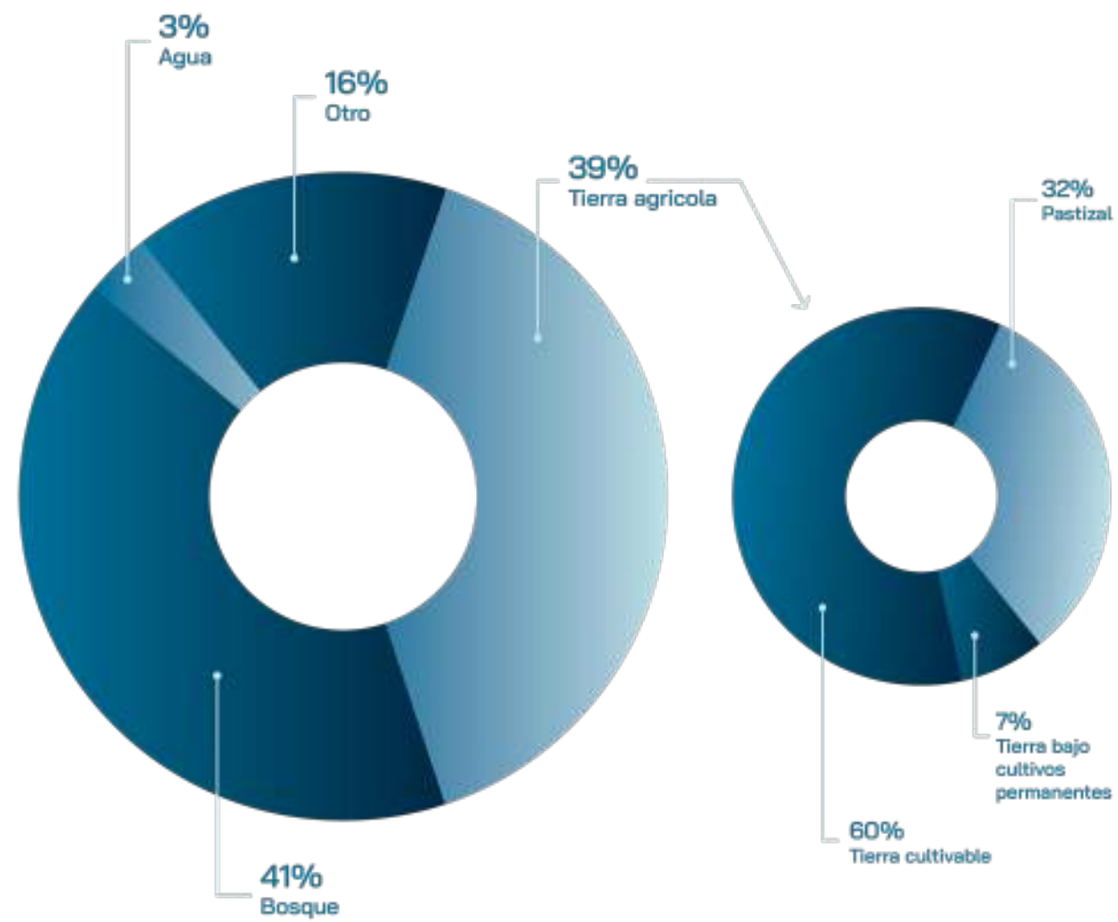
que abundan en la agricultura, incluidos el carbono y el metano[38].

Los estudios sobre desalación también abren la puerta a dotar a esta tecnología de un mayor protagonismo en determinados ámbitos. En Estados Unidos, el 24% de toda el agua de la industria alimentaria se utiliza para el procesamiento de carne y el 12% para la producción de lácteos y queso. En el primer caso, adoptar la desalación de las aguas residuales de la salmuera de pieles podría recuperar más del 60% de las sales para su reutilización. La industria láctea y quesera produce seis veces más agua residual en volumen de la que consume, de modo que dispone de oportunidades similares para la recuperación de sal. En ambas industrias, mejorar los procesos de separación de sal y proteínas podría aumentar la reutilización de la sal a un coste menor[39].

La superficie agrícola de regadío creció en más de medio millón de hectáreas en España entre 2004 y 2021, hasta los 3,9 millones, con los cereales de grano (24,1% del terreno), el olivar (22,6%), los frutales no cítricos (10,6%) y el viñedo (10,3%), en cabeza. Supone ya un 22,6% de la superficie cultivada, pero contribuye en un 65% a la producción final vegetal. A pesar de eso, el consumo de agua se estancado en este tiempo gracias a la introducción de tecnología[40], lo que no impide que el 71% de los recursos para riego sean todavía aguas superficiales y el 23,5%, subterráneas, mientras que los recursos no convencionales suponen apenas un 2,8% del total[41].

La tecnología digital contribuye al tratamiento y la reutilización de agua agrícola, para su integración con otras fuentes de suministro, aunque todavía tiene mucho margen de evolución. Las técnicas de teledetección, como los drones y los satélites, se han utilizado ampliamente para monitorizar el estado de salud de los cultivos y el uso del agua del suelo en diferentes escalas espaciales. Sobre el terreno, los sensores que proporcionan información en tiempo real acerca de aspectos como la humedad, la conductividad, la salinidad, el pH y la temperatura del suelo necesitan dotarse de más resiliencia y estabilidad para que su labor de monitorización alimente

Uso del suelo en la Unión Europea



Fuente: Eurostat/OCDE

JAVIER GARCÍA

Las nuevas tecnologías ofrecen soluciones clave para mejorar la gestión del agua en España, un país que enfrenta retos significativos debido a la sequía y la distribución desigual de recursos hídricos. Innovaciones como sensores inteligentes, imágenes satelitales y el internet de las cosas (IoT) permiten una monitorización más precisa de los sistemas de abastecimiento y distribución, optimizando el uso del agua en sectores agrícolas, industriales y urbanos. Además, las tecnologías avanzadas de tratamiento de agua, como la desalación con energía renovable y la reutilización de aguas residuales, contribuyen a asegurar un suministro sostenible. Estas herramientas no solo mejoran la eficiencia, sino que también permiten una gestión más racional y efectiva que nos permita hacer frente a las consecuencias del cambio climático.

sistemas completamente autónomos. Los materiales de los que se componen deben resistir la contaminación por sal, sedimentos, materia orgánica natural o algas y ser resistentes a las condiciones físicas variables del entorno en el que se ubican. Los sistemas de sensores remotos deben integrarse asimismo en el internet de las cosas, con inteligencia distribuida que permita la toma de decisiones localizada, y conectarse a las redes de telecomunicaciones a través de Wi-Fi, 5G o conectividad basada en satélites o microondas, para beneficiarse del procesamiento, almacenamiento y análisis de datos en la nube. Con su propuesta de big data, unida a un sistema de inteligencia artificial mediante aprendizaje automático, la startup Kilimo ayuda a los agricultores a vender compensaciones de agua a empresas que desean ser neutrales en cuanto a su consumo. Gracias a su actividad en Latinoamérica, se han generado ahorros de más de 72.000 millones de litros de agua en la región[42]. Se trata de un sector cuyos componentes trabajan habitualmente con márgenes económicos pequeños, lo que requiere de soluciones de bajo coste[43].

Es un inconveniente similar al que deben vencer las tecnologías de selección genética que propician variedades de cultivos más resilientes ante la falta de agua. El rendimiento no está garantizado y se necesitan hasta diez años de investigación antes de cada lanzamiento al mercado[44], lo que aleja estas soluciones de la iniciativa proveniente de las pequeñas y medianas empresas. Cuando la genética funciona, como ha quedado patente en cultivos como la soja, unida a la labranza de conservación y los cultivos de cobertura, contribuye a mantener la humedad de los suelos y a conseguir rendimientos impensables hace 20 años en las actuales condiciones climáticas[45]. A medio camino con el sector digital, InnerPlant desarrolla una tecnología de semillas que aprovecha la fisiología de las plantas y desbloquea datos para mejorar los rendimientos agrícolas[46]; y la israelí SupPlant utiliza un algoritmo avanzado que analiza datos en tiempo real de las de plantas, junto a los que proporcionan los sensores meteorológicos y de suelo, y los traduce en recomendaciones de riego e información útil. Su tecnología está dirigida principalmente a los propietarios de grandes extensiones de tierra, que representan apenas alrededor del 2% de todos los agricultores del mundo, pero la ha adaptado para los pequeños agricultores con una nueva versión más barata[47].

Las innovaciones en materia de riego deben introducirse teniendo en cuenta no sólo su impacto en la productividad, sino también en la equidad, la desigualdad y la justicia social en relación con el acceso al agua, la infraestructura y los avances tecnológicos. Hoy en día, más de la mitad de las tierras agrícolas están degradadas, lo que genera pérdidas de productividad de 400.000 millones de dólares al año y, en el centro del foco, se encuentran las pequeñas explotaciones agrícolas que producen el 29% de los cultivos del mundo[48]. Una característica notable de la cadena de suministro de agua es la importancia de las consideraciones de economía política y el papel crucial del sector público en su establecimiento y gestión[49]. Entidades como el World Economic Forum instan por ello a adoptar enfoques multidisciplinares, como los que representa el nexo agua-energía-alimentos. Las acciones en cada uno de esos ámbitos influyen en los demás, de manera sinérgica o adversa, en diferentes niveles y escalas[50].

Así, el desarrollo de una agricultura eficiente en el uso del agua implica, en muchos casos, un incremento significativo en el consumo de energía[51], hasta el punto de que la subida de precios de esta última se ha convertido recientemente en la nueva amenaza a la sostenibilidad de la agricultura de regadío. Tratar el agua no convencional, requiere más energía (0,3–2,1 kWh m^3 para aguas residuales; 0,951–1,942 kWh m^3 para agua salobre; 4,0 kWh m^3 para agua de mar) que el agua dulce cruda (0–0,198 kWh m^3). Desde algunas instancias se llama incluso a dar prioridad a la agricultura de secano siguiendo la estela del éxito de Marruecos a la hora de obtener rentabilidad a este tipo de cultivos y contribuir con ello a la economía nacional. No debería ser necesario llegar a tanto si se aprovechan las tecnologías de la cuarta revolución industrial para cambiar el paradigma de los silos individuales por el del nexo integrador, especialmente por su capacidad para desarrollar nuevas herramientas de integración, cuantificación y visualización. Los precios mundiales de los alimentos habrían sido entre un 35% y un 65% más altos sin las tecnologías de la Revolución Verde, incluido el riego[52], pero los impactos directos e indirectos en la producción habrían dado como resultado una producción agrícola entre un 4% y un 7% mayor en el mundo desarrollado y entre un 14% y un 19% menor en el mundo en desarrollo[53].

Los datos constituyen, en ese sentido, una vez más, el punto de referencia clave. En ese sentido, la realidad todavía se encuentra lejos de lo deseable en nuestro país, pese a que sufre uno de los niveles de estrés hídrico más altos de la OCDE: se estima que a partir de 2040 recibirá de media un 12% menos

de aportaciones y entre 2070-2100 la caída puede ser del 24%. La puesta en marcha de la Estrategia de Digitalización del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación[54] a través del II Plan de Acción 2021-2023 ha tratado de corregirlo con la creación de un sistema de agregación de datos específico para el sector agroalimentario, la plataforma de big data BigMAPA, el impulso de las herramientas digitales ya existentes (SiAR, SIEX), un Observatorio de Digitalización del sector agroalimentario y un programa de apoyo a la agricultura de precisión y tecnologías 4.0 en el sector. Pero el propio Perte de Digitalización del Ciclo del Agua reconoció que "debido, entre otros factores, a la incompleta digitalización del ciclo del agua, no se dispone, en plena sociedad del conocimiento, de información completa sobre el uso del agua".

En España, son las autoridades de cuenca, y no las autoridades agrícolas encargadas de las políticas de riego, las que determinan el volumen de agua suministrada a las explotaciones, en función de la disponibilidad de recursos y de los derechos de los usuarios, en particular a través de las comunidades de regantes. Las pequeñas extracciones de aguas subterráneas inferiores a 7.000 m3 /año deben registrarse, pero no requieren autorización, y no se conoce completamente el alcance del problema de las extracciones ilegales debido a la falta de datos oficiales. Alrededor del 20% al 35% de las masas de agua subterráneas y superficiales están en riesgo de contaminación difusa, con altas concentraciones de nitrato, eutrofización por exceso de fósforo y salinización en el caso de algunas zonas de la costa mediterránea. Tampoco resulta sencillo conocer los precios del agua establecidos por las autoridades de cuenca en España, lo que complica hacer una evaluación fiable sobre recuperación de costes, sobre el impacto en los precios de la escasez de agua y métodos de fijación de precios, aunque desde 2009 es necesario instalar de medidores y precios volumétricos para recibir ayudas públicas para la modernización de sistemas de riego[55].

Los datos permiten construir una estrategia de impulso de sistemas de gestión que ayude a aumentar la productividad del agua (WP) en la agricultura, la métrica preferida utilizada para medir la efectividad del riego. En países en vías de desarrollo ha quedado demostrado que los desarrollos liderados por los agricultores son más productivos que los planes de riego colectivos liderados por el gobierno[56]. Cuando el sector agrario toma la gestión del agua en sus propias manos, innova para aumentar la producción suplementando los cultivos de secano y cultivando una cosecha adicional durante la estación seca. Por lo tanto, acumulan mayores beneficios en forma de mejor nutrición, más ingresos y mayor resiliencia climática.

Enfoque poliédrico para el campo español

ESPAÑA

El propio Perte de Digitalización del Ciclo del Agua reconoce que, ante la falta de una digitalización plena del ciclo de uso del agua, tanto a nivel de usuarios como de Administración, en España no se dispone de información suficiente sobre el consumo y las pérdidas de agua en las redes de distribución por fugas, roturas o filtraciones. En los últimos años, han aparecido diferentes cambios normativos en la legislación en materia de agua que han incidido en un mayor control de los caudales concedidos en las concesiones y, a partir de ellos, de los consumos de los usuarios. Los concesionarios de las aguas deben contar con sistemas de medición que permitan comprobar y controlar los caudales utilizados. Sin embargo, todavía queda camino por recorrer[57].

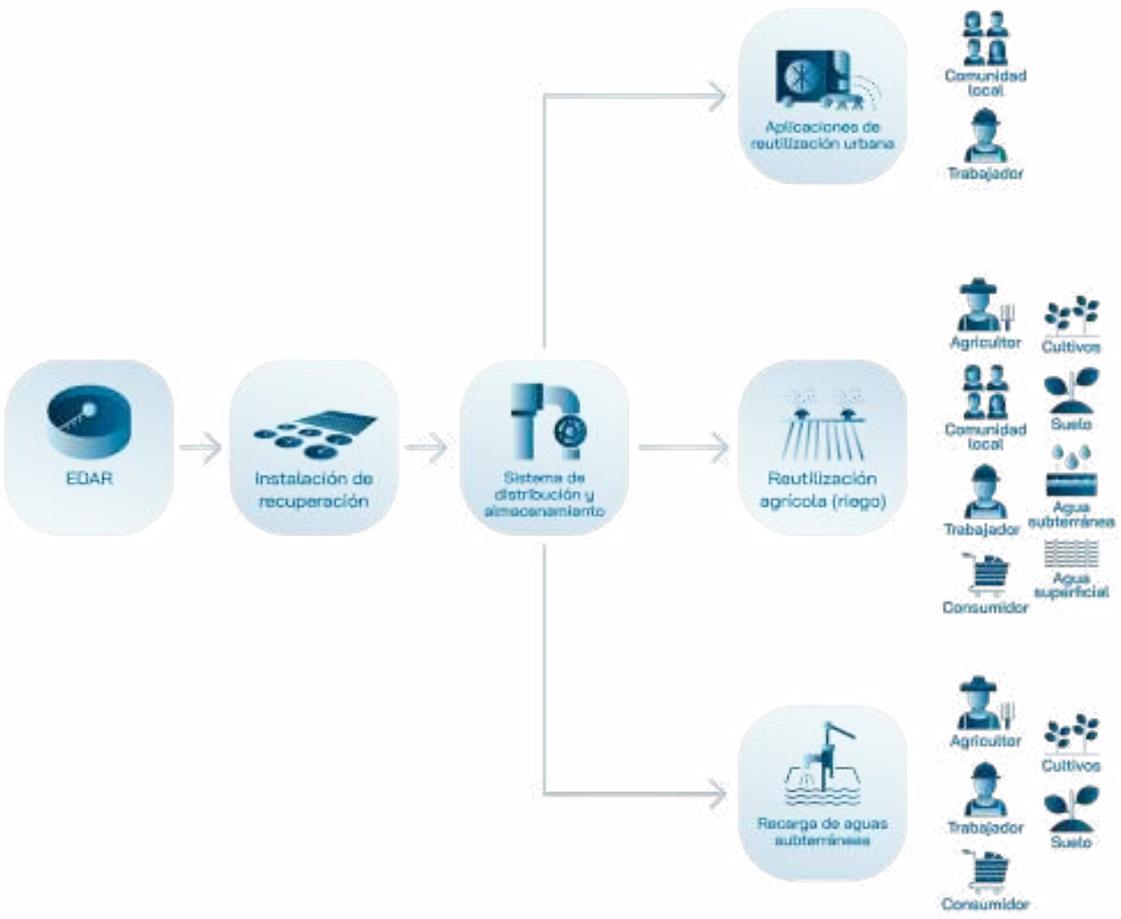
La gran mayoría de los regadíos se gestionan de forma comunitaria y se distribuyen del siguiente modo: el sistema de riego localizado se encuentra implantado en 2.032.755 hectáreas, que suponen el 53% del total de la superficie regada; le sigue el sistema de riego por gravedad, que se aplica en el 23,56% del suelo en explotación; el sistema de riego alcanza una cuota del 14,95%; y en cuarto lugar se sitúa el riego automotriz, presente en el 8,4% de la superficie[58]. Con visión de futuro, los escenarios de cambio climático para España prevén una menor disponibilidad de agua, con una reducción de los recursos hídricos disponibles entre el 12% y el 40% antes de final de siglo dependiendo de las regiones, y una distribución más irregular de las lluvias, por lo que es imprescindible seguir mejorando la eficiencia y la sostenibilidad del regadío.

En septiembre de 2023, el Ministerio de Agricultura puso en marcha La Vega Innova, un hub de innovación digital (iHub) previsto en el Plan de Recuperación Transformación y Resiliencia, para impulsar la transformación del sector agroalimentario a través de la experimentación en entornos reales. Telefónica España fue la adjudicataria del contrato para la prestación de servicios de este centro que debe funcionar como una incubadora de empresas emergentes. En la primera convocatoria, entre las empresas seleccionadas se incluyó a AonChip, especializada en internet de las cosas y ubicada en Barcelona, cuyo objetivo es mejorar la eficiencia en el uso del agua en entornos agrícolas, especialmente en áreas con dificultades de comunicación. Para ello, ofrece sensores y controladores de riego con conectividad de largo alcance y bajo consumo.

Las líneas de ataque del problema del agua en la agricultura pueden ser insospechadas. Arada, una innovadora empresa de ingeniería originaria de Lorca, observó que una parte sustancial del agua que consume el sector agrario en nuestro país se almacena en balsas descubiertas, y eso provoca que entre un 7% y un 13% de los recursos se pierdan por evaporación. Hay 67.000 balsas en España y menos del 0,1% están cubiertas. Para resolverlo lanzó H2OLock, un sistema con el que reduce la evaporación en las balsas de riego hasta en un 85%, y se evita también el crecimiento de algas. Combina módulos flotantes individuales, similares a boyas, que se ensamblan como un puzle gracias a su forma hexagonal y cubren por completo cualquier balsa de riego[59].

En el ámbito de la I+D, el proyecto Agreen, impulsado por Aigües de Barcelona junto a la Universitat Politècnica de Catalunya y Cetaqua, quiere demostrar que el agua regenerada es segura y que es una solución óptima para la actividad agrícola. Para ello, en el Parc Agrari del Baix Llobregat ha implantado una estación piloto en un invernadero de la Agrópolis de la UPC con distintos cultivos experimentales regados con hasta seis tipos de aguas de diferentes orígenes del Baix Llobregat, entre ellas la regenerada. En una línea similar, el proyecto europeo LIFE WARRIOR se basa en la implementación de membranas recicladas para producir agua de calidad apta para riego agrícola, revalorizar el residuo y reducir la huella de carbono. Y en el Parla Innovation Center de John Deere se ha llevado a cabo un proyecto de I+D pionero que permite conseguir un ahorro significativo del agua de riego de viñedos, a través del uso de tecnología IoT y analítica de datos en tiempo real en la nube. Han sumado fuerzas Spherag, líder internacional en soluciones de IoT, la empresa Azud, especializada en riego eficiente, y Metos, especialista en agricultura de precisión, además de la Universidad Politécnica de Madrid, a través de la profesora de Viticultura Pilar Baeza.

Poblaciones y ambientes expuestos asociados a diferentes usos finales del agua regenerada.



Fuente: Joint Research Center de la Comisión Europea

Sin embargo, en los últimos años, la productividad agrícola ha aumentado a un ritmo más lento que en otros países de la OCDE, mientras que el desempeño de sostenibilidad ambiental del sector no ha mejorado en línea con las expectativas. Este progreso estancado no se debe a una ambición insuficiente o a la falta de recursos, sino más bien al diseño y la implementación de políticas.

Relación de notas

[1] Ignacio Carrascón. "**Del 5% en Letonia al 0,2% en Luxemburgo: así es el peso de la agricultura en las economías europeas**". Newtral. Publicado el 10/02/2024, consultado el 04/05/2024.

[2] "**Huella hídrica: qué es y cómo reducirla para hacer frente a la crisis del agua**". Pacto Mundial. Publicado el 18/03/2024, consultado el 04/05/2024.

[3] ONU (2010). "**El derecho humano al agua y el saneamiento**". Consultado el 04/05/2024.

[4] ONU (2015). "**United Nations Sustainable Development Summit 2015**". Consultado el 04/05/2024.

[5] "**El agua en la historia de la humanidad**". Fundación Aquae. Publicado el 01/03/2022, consultado el 04/05/2024.

[6] "**¿Cuánta agua hay en la tierra? ¿Y cuánta es apta para el consumo?**" Fundación Aquae. Consultado el 04/05/2024.

[7] Thais Carrança. "**Por qué el precio del aceite de oliva está en máximos históricos y probablemente no bajará**". BBC News Mundo. Publicado el 23/08/2023, consultado el 04/05/2024.

[8] Raul Sánchez, Victòria Oliveres y Yuly Jara. "**El mapa de las reservas de agua en España: los datos, embalse por embalse**". Publicado el 07/05/2024, consultado el 07/05/2024.

[9] Sofía Soler. "**El turismo ante la sequía: entre el miedo a las restricciones y la responsabilidad en el gasto de agua**". RTVE. Publicado el 15/06/2023, consultado el 04/05/2024.

[10] Luis Velasco. "**El gran viñedo catalán se seca**". El País. Publicado el 17/03/2024, consultado el 04/05/2024.

[11] Dani Cordero. "**Freixenet presenta un ERTE para 615 empleados por la sequía**". Publicado el 22/04/2024, consultado el 04/05/2024.

[12] PwC (2018). "**La gestión del agua en España. Análisis y retos del ciclo urbano del agua**". Consultado el 04/05/2024.

[13] Antonio Gallegos Reina. "**Una nueva cultura del agua y el territorio para prevenir las inundaciones**". The Conversation. Publicado el 23/09/2021, consultado el 04/05/2024.

[14] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (n.d.). "**Orientaciones y gobernanza en la gestión del agua y cambio climático**". Consultado el 04/05/2024.

[15] Jesús Mirás Araujo y Nuria Rodríguez Martín. "**Así ha cambiado la gestión del agua en España desde el franquismo**". Publicado el 21/03/2023, consultado el 04/05/2024.

[16] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (n.d.). "**Libro Verde de la Gobernanza del Agua**". Consultado el 04/05/2024.

[17] UNESCO (2024). "**Water crises threaten world peace (report)**" Consultado el 04/05/2024.

[18] J Sang et al. Journal of Hydrology, 2023, 617, Part B, 128881, DOI: **10.1016/j.jhydrol.2022.128881**

[19] Constance Meyer y Maxime Rousseau. "**España: el desafío de la gestión del agua en el país más árido de Europa**". France 24. Publicado el 18/09/2019, consultado el 04/05/2024.

[20] Griselda Romero. "**La importancia de los recursos no convencionales en la gestión hídrica**". Revista RETEMA. Publicado el 15/01/2024, consultado el 04/05/2024.

[21] Alberto Garrido y Luis Garrote. "**La adaptación al cambio climático: los recursos hídricos en España. Un reto social, económico y territorial ante un escenario acelerado de cambio.**" Informe España – Universidad Pontificia de Comillas. Publicado el 28/11/2023, consultado el 04/05/2024.

[22] Manuel Pérez Padilla. "**Una reflexión sobre el tecnooptimismo**". El Salto. Publicado el 23/02/2023, consultado el 04/05/2024.

[23] Gobierno de España (2022). "**PERTE de digitalización del ciclo del agua**". Consultado el 04/05/2024.

[24] Patricia Ruiz Guevara. "**Garantizando el agua en España**". Publicado el 25/09/2023, consultado el 04/05/2024.

[25] Águeda García de Durango. "**Los satélites son fundamentales para abordar la gestión del agua en el mundo**". iAgua. Publicado el 26/03/2019, consultado el 04/05/2024.

[26] ESA (2009). "**ESA Operations team meets SMOS challenge**". Consultado el 04/05/2024.

[27] F Dolan et al. Nature Communications. 2021, 12, 1915, DOI: **10.1038/s41467-021-22194-0**

[28] "**MANIFESTO. The European Union needs an ambitious Water-Smart Strategy**", Water Europe, 30 de junio de 2023

[29] Colin Strong, Samantha Kuzma, Samuel Vionnet, Paul Reig, "**Achieving Abundance: Understanding the Cost of a Sustainable Water Future**", World Resources Institute, 21 de enero de 2020

[30] "**European Coalition urges action from the European Commission to deliver the Water Resilience Initiative**", Water Europe, 12 de marzo de 2024

[31] Policies for the Future of Farming and Food in the European Union, OCDE, 9 de octubre de 2023, DOI: **10.1787/32810cf6-en**

[32] David Sedlak et al. "**Master Technology Roadmap**", National Alliance for Water Innovation, 2021

[33] Thomas Borch et al. **Technology Roadmap: Agriculture Sector, National Alliance for Water Innovation** (NAWI), 2021

[34] **The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum.** FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO, 2023, https://doi.org/10.4060/cc3017en

[35] **https://www.aimforclimate.org/**

[36] **https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/international-financial-institution-ifi-action-plan-address-food-insecurity_en**

[37] Maia Sparkman, **Amplifying the IRA: Prioritizing investment in US agricultural innovation**, The Atlantic Council, 23 de agosto de 2022

[38] Seth M. Siegel, "**Revolutionizing Agriculture: Innovative Irrigation Solutions for a Sustainable Water Future**", agritechtomorrow.com, 20 de febrero de 2024

[39] Thomas Borch et al. **Technology Roadmap: Agriculture Sector, National Alliance for Water Innovation** (NAWI), 2021

[40] Judit Montoriol Garriga, "**El uso del agua en la agricultura: avanzando en la modernización del regadío y la gestión eficiente del agua**", CaixaBank Research, 1 de abril de 2022

[41] **PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua**, Gobierno de España, marzo de 2022

[42] Megan Gerryts, Federico Ronca, Bianca Bertaccini, "**Here's how technology is helping solve agriculture's biggest issues**", World Economic Forum, 9 de noviembre de 2023

[43] **Thomas Borch et al.**

[44] "**Elicit Plant's CEO on the Urgent Need to Address Water Access Challenges**", World Agri-Tech Innovation Summit 2024

[45] Neal Bredehoeft, "**Ground Work 2022: Missouri Soybean Harvest Better Than Expected**", ussoy.org, 30 de noviembre de 2022

[46] Magi Richani, "**Why Climate Action Could Fall Short Without Agricultural Innovation**", forbes.com, 26 de febrero de 2024

[47] Ilana Shotoland/Maariv, **New Israeli innovation helps farmers to save water**, *The Jerusalem Post*, 15 de octubre de 2022

[48]Hannah Ritchie, "**Smallholders produce one-third of the world's food, less than half of what many headlines claim**", OurWorldInData.org, 6 de agosto de 2021

[49] David Zilberman, Alice Huang, Lanie Goldberg, Thomas Reardon, **The evolution of symbiotic innovation, water, and agricultural supply chains,** *Applied Economic Perspectives and Policy*, 11 de marzo de 2023, DOI: 10.1002/aepp.13342 consultado el 30/05/2024

[50] Mark D. Smith, Alok Sikka, Tinashe L. Dirwai, Tafadzwanashe Mabhaudhi, **Research and innovation in agricultural water management for a water-secure world**, Irrig. and Drain, 19 de agosto de 2023, Doi: 10.1002/ird.2872 consultado el 30/05/2024

[51] G. **Belaud et. al. Irrigation and energy: issues and challenges,** Irrig. and Drain, 26 de abril de 2019 DOI: 10.1002/ird.2343 consultado el 04/06/2024

[52] Evenson, R. E., & Gollin, D. **Assessing the impact of the Green Revolution**, 1960 to 2000, Science, 2003 DOI: 10.1126/science.1078710

[53] Giordano, MF , Namara, RE & Bassini, E. **Los impactos del riego: una revisión de la evidencia publicada**, Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, Banco Mundial, 2023

[54] **https://www.mapa.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-digitalizacion-sector-agroalimentario/estrategia_digitalizacion_sector_agroalimentario_forestal_medio_rural_ve_tcm30-509645.pdf**

[55] **Policies for the Future of Farming and Food in Spain**, OCDE, 28 de junio de 2023, DOI: 10.1787/a93d26be-en

[56] "**Agricultural water management innovations to build resilient food systems in West Africa**", International Water Management Institute, 2021

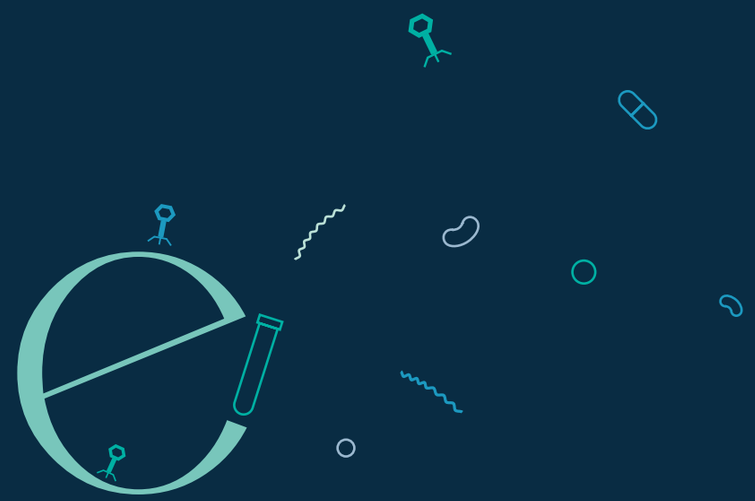
[57] **Policies for the Future of Farming and Food in Spain**, OCDE, 28 de junio de 2023, DOI: 10.1787/a93d26be-en

[58] **PERTE de Digitalización del Ciclo del Agua**, Gobierno de España, marzo de 2022

[59] Representación en España, **"Preservar el agua para la agricultura con el impulso de la Unión Europea**", Comisión Europea, 9 de octubre de 2023

03

El resurgir de los fagos



El resurgir de los fagos en la sanidad

Los virus bacteriófagos –o, simplemente, "fagos"– son una tecnología que parece ciencia ficción. Descubiertos casi al mismo tiempo que la penicilina, como una herramienta para luchar contra las infecciones bacterianas, los fagos cayeron en el olvido, eclipsados por el éxito de los antibióticos popularizados durante la Segunda Guerra Mundial. Pero, décadas después, estos seres microscópicos han vuelto a saltar a la fama. En los últimos años, el incremento de las infecciones causadas por bacterias resistentes a los antibióticos –exacerbado por el uso excesivo e inadecuado de estos medicamentos– se ha convertido en uno de los problemas de salud pública más graves a los que se enfrenta la humanidad. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que las bacterias resistentes fueron directamente responsables de 1,27 millones de muertes en 2019 y,[1] según varios estudios, este número podría multiplicarse por diez antes de 2050.[2] En este contexto, los fagos han resurgido como una alternativa prometedora para combatir las infecciones bacterianas. Estos virus combinan varias ventajas –una gran selectividad, la posibilidad de multiplicarse, la adaptabilidad– que los convierten en una herramienta muy poderosa en la lucha contra las enfermedades infecciosas. Además, pueden usarse en otras terapias más allá de la eliminación de bacterias patógenas, incluidos tratamientos contra el cáncer o enfermedades genéticas como la fibrosis quística.

El virus que come bacterias

POR DENTRO

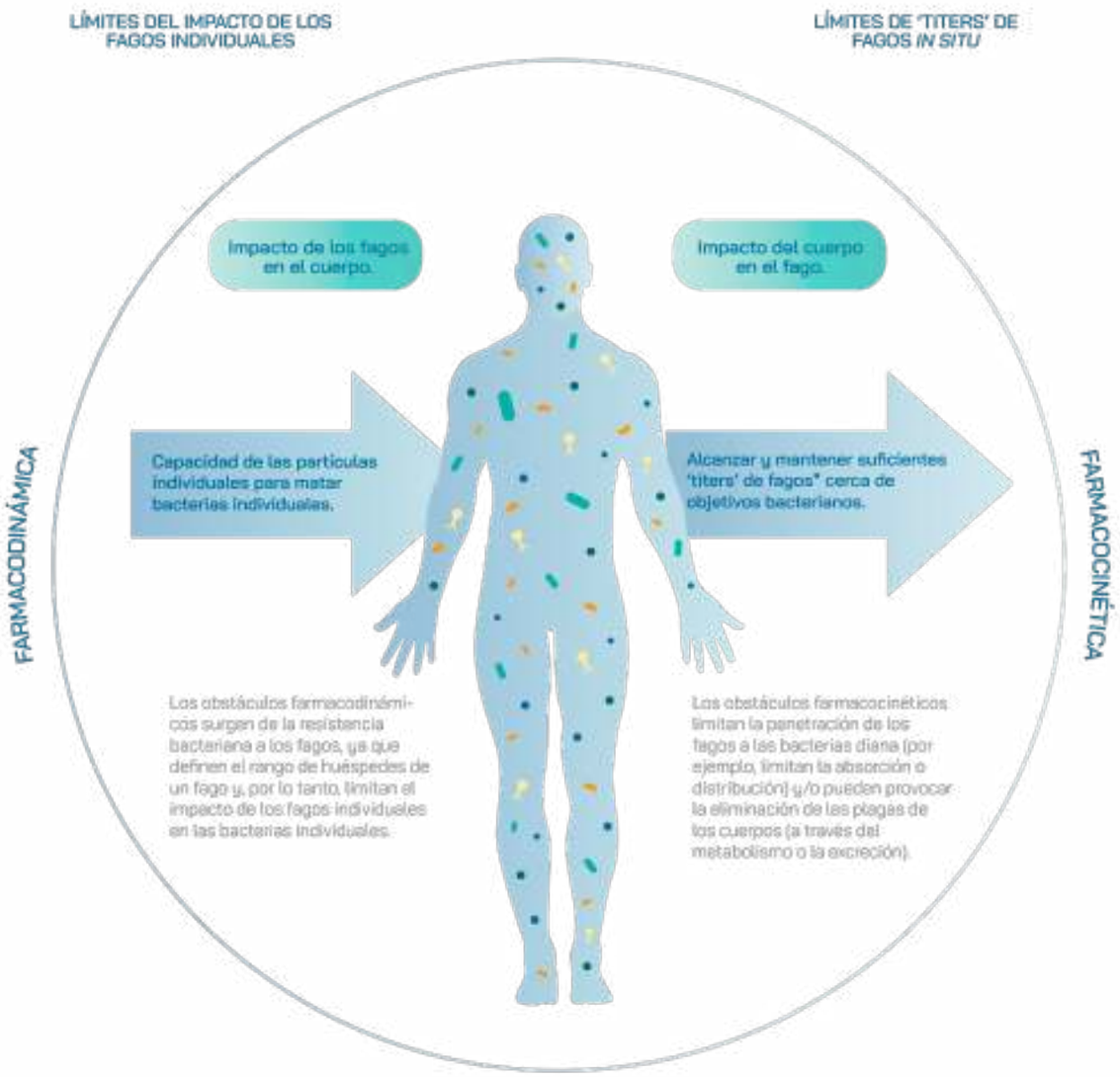
Aunque parezca contraintuitivo, el descubrimiento de los fagos como arma contra las bacterias patógenas precede al descubrimiento de la penicilina. El microbiólogo francés Felix d'Herelle descubrió un "antagonista invisible" que era capaz de aniquilar a las bacterias. Al principio lo llamó así porque era un organismo tan pequeño que atravesaba los filtros desarrollados por Chamberland y Pasteur para eliminar bacterias de sus muestras de agua. Sin embargo, d'Herelle pronto se dio cuenta de que estaba ante un nuevo tipo de virus, que bautizó como "bacteriófago", literalmente el virus "comebacterias". Más adelante, d'Herelle llevó a cabo varios experimentos que, entre otras cosas, demostraron que los fagos podían infectar y matar a las bacterias que causan el cólera, la disentería y la peste.[3] D'Herelle utilizó fagos para tratar con éxito infecciones bacterianas en humanos, un avance revolucionario en ese momento. Sin embargo, a pesar de este éxito inicial, los científicos occidentales dejaron de prestar atención a los fagos, asombrados por las aplicaciones y la versatilidad de la penicilina como antibiótico.

La investigación de fagos continuó en la antigua Unión Soviética gracias a George Eliava, un colega y colaborador de d'Herelle que fundó un instituto de investigación en la actual Georgia. Aunque Eliava fue ejecutado en 1937 por el régimen totalitario de Joseph Stalin, el apoyo soviético a la investigación permitió que continuara el desarrollo de fagos terapéuticos. Formaba parte del sistema estándar de atención médica en la Unión Soviética. Dependiendo del tipo de infección, los sanitarios decidían si utilizar fagos, antibióticos o una combinación de ambos métodos, cuenta la doctora rusa Mzia Kutateladze en una entrevista a la BBC.[4] Durante mucho tiempo, esta terapia se consideraba prácticamente una pseudociencia en occidente, en parte por las implicaciones políticas de la Guerra Fría, pero también por la falta de acceso a las publicaciones sobre el tema, a menudo difíciles de encontrar y solo disponibles en ruso.[5] Tras muchos años en la sombra, los fagos se volvieron famosos de nuevo a finales de los 1990 y principios de los 2000, cuando científicos del instituto georgiano fundado por Eliava consiguieron curar a un paciente canadiense de una infección causada por una bacteria resistente.[6] Estos resultados tan positivos, combinados con la creciente preocupación sobre el aumento de las infecciones causadas por bacterias resistentes a los antibióticos, renovaron el interés en los fagos.
Desde entonces, ha habido un resurgimiento significativo en la investigación y el desarrollo de terapias basadas en fagos. En los últimos años, se han logrado avances significativos en la comprensión de la biología de los fagos y en el desarrollo de técnicas para utilizarlos como agentes antimicrobianos. Actualmente se conocen miles de tipos diferentes de fagos, específicos para aniquilar a diferentes tipos de bacterias y otros microbios. Esta diversidad ofrece un ejemplo del amplio espectro de posibilidades terapéuticas para combatir una variedad de infecciones bacterianas.[7]

Los antibióticos como la penicilina –y todos los medicamentos desarrollados después– son sustancias químicas, más o menos complejas, que interactúan con algunos de los procesos bioquímicos de las bacterias, interrumpiendo su viabilidad.[8] Sin embargo, los fagos son virus, estructuras mucho más avanzadas, capaces de parasitar y aniquilar a las bacterias. Como entidades biológicas, tienen relaciones complejas y coevolutivas con ellas. Los fagos presentan dos tipos distintos de ciclos vitales: el ciclo lítico y el ciclo lisogénico. En el primero, el fago se adhiere a la membrana bacteriana e inyecta su material genético dentro de la bacteria. El virus se aprovechará de la maquinaria celular de la bacteria, incluidas sus proteínas y enzimas, para generar copias de sí mismo y, después, ensamblarlas, formando nuevos fagos – normalmente entre 50 y 200. Una vez el ejército de descendientes está listo, se provoca la ruptura –o lisis, de ahí el nombre del ciclo– de la bacteria y se liberan los fagos al medio, listos para propagar la infección y adherirse a nuevas bacterias para comenzar el ciclo nuevamente. En el ciclo lisogénico, los fagos insertan su material genético en el ADN de la bacteria, lo que otorga a la bacteria inmunidad contra infecciones sucesivas. Cuando la bacteria se reproduzca, hará una copia de su ADN y, con ello, copias del ADN del fago, que permanece latente hasta que se den las condiciones para "activarse" y empezar un proceso de infección.

En el contexto de los usos terapéuticos, los fagos que pueden realizar ciclos líticos suelen ser los más relevantes.[9] En este sentido, por lo tanto,

Obstáculos farmacológicos para el éxito terapéutico



*Prueba de laboratorio que mide la presencia y cantidad de anticuerpos en la sangre.

Fuente: ASM Journals

es necesario aislar y caracterizar fagos que puedan ser específicos y selectivos contra las bacterias responsables de infecciones peligrosas, para poder amplificarlos y administrarlos de una forma segura, pero que permita que entren en contacto directo con el patógeno. Por ejemplo, en una infección osteoarticular como la que tenía el paciente canadiense tratado en Georgia, se recomienda lavar la herida con una solución de fagos antes de coserla y cerrarla al final de la cirugía. Los fagos, al multiplicarse en contacto con las bacterias, se dispersarán y terminarán con la infección siempre y cuando queden bacterias sin infectar. Una vez que se elimine por completo la bacteria infecciosa, los fagos, que no pueden sobrevivir sin un huésped donde reproducirse, morirán también.

En los últimos años, se han presentado resultados muy prometedores usando fagos como terapia en varios casos considerados críticos, algo que, por desgracia, se está volviendo cada vez más común con el incremento gradual de la resistencia a los antibióticos. Algunos estudios demuestran que los fagos pueden reducir la creación de resistencia en las bacterias[10] y consiguen acabar con infecciones causadas por *Staphylococcus aureus*, uno de los patógenos más peligrosos si genera resistencia a los antibióticos.[11] Además, la gran especificidad de los fagos –capaces de reconocer no solo especies concretas de bacterias, sino en ocasiones incluso cepas distintas de una misma especie– permite ataques selectivos al patógeno responsable de la infección y consigue preservar a las bacterias "buenas", técnicamente conocidas como bacterias comensales, que componen nuestra microbiota natural.[12]

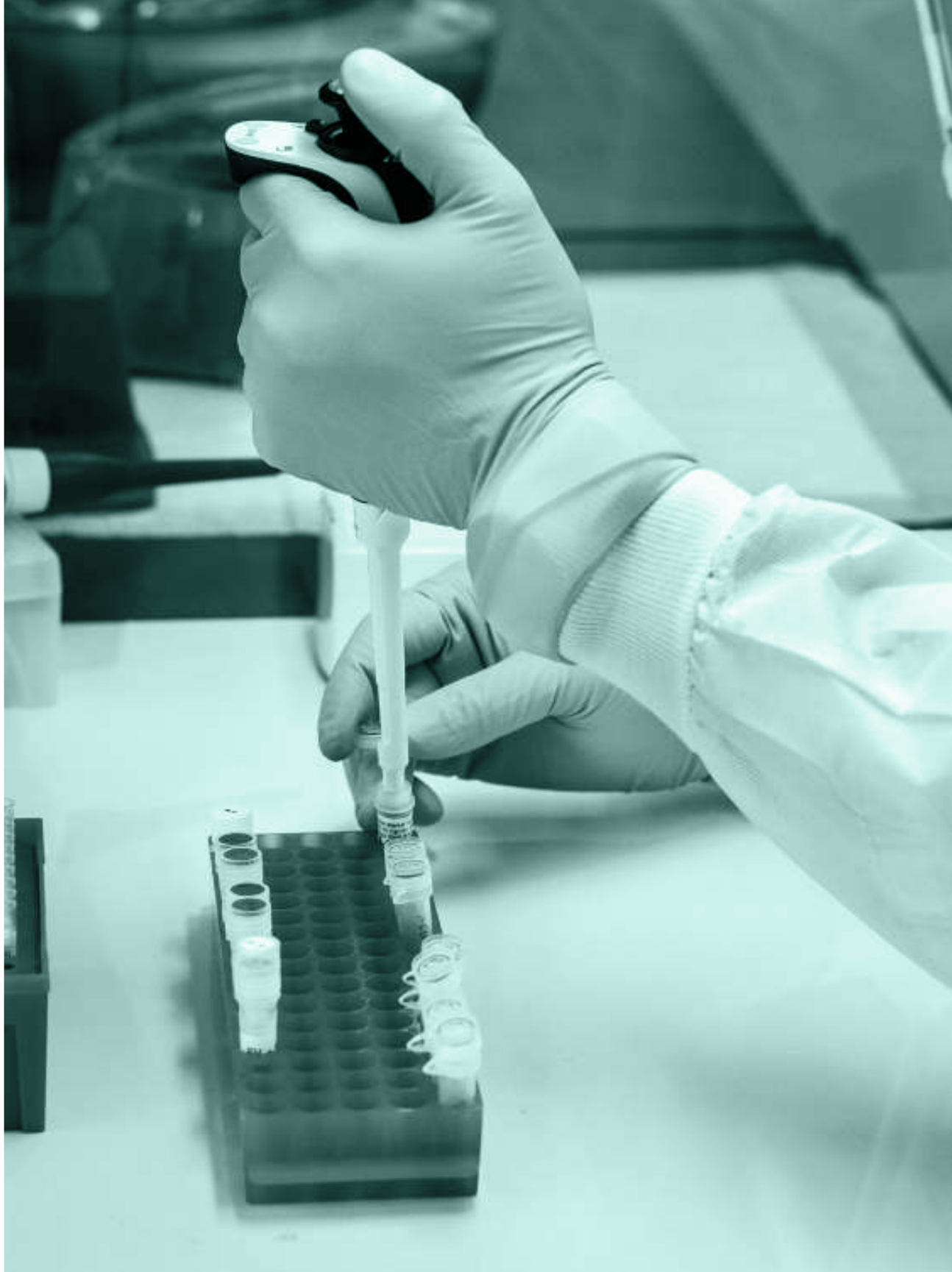
La terapia con fagos tiene un gran potencial como tratamiento alternativo a los antibióticos, sobre todo porque presenta una serie de ventajas muy significativas frente a los tratamientos tradicionales. A diferencia de los antibióticos de amplio espectro, que matan indiscriminadamente tanto a bacterias perjudiciales como beneficiosas, los fagos son extremadamente específicos, y están "programados" para atacar solamente a un tipo específico de patógenos. Esta especificidad reduce el riesgo de alterar la microbiota natural del cuerpo, esencial para mantener nuestra salud tanto física como mental. A veces, es necesario mejorar todavía más esta especificidad natural en el laboratorio, para lo cual se utilizan técnicas de edición genética como CRISPR.[13]

Otra ventaja de los fagos es su capacidad para evolucionar –coevolucionar, en realidad– junto con las bacterias. Las bacterias pueden desarrollar resistencia a los antibióticos a través de mutaciones genéticas, es precisamente este mecanismo de defensa genético lo que vuelve ineficaces a nuestros medicamentos a lo largo del tiempo. Sin embargo, los fagos

pueden evolucionar todavía más rápidamente para superar la resistencia bacteriana – son un arma dinámica y adaptable contra patógenos resistentes.[14] Además, los fagos pueden llegar a penetrar en áreas de difícil acceso, como biofilms –comunidades de bacterias que viven en una matriz pegajosa de polisacáridos– e infecciones dentro de las propias células, donde los antibióticos pueden tener dificultades para penetrar. Esto hace que la terapia con fagos sea especialmente prometedora para tratar tanto infecciones crónicas como infecciones persistentes que no responden a los tratamientos con antibióticos convencionales.[15]

Los fagos pueden administrarse por vía oral, tópica o intravenosa, según el tipo de infección y su ubicación. También pueden usarse en combinación con antibióticos para aumentar su eficacia y reducir el riesgo de desarrollo de resistencia. Además, se ha demostrado que los fagos tienen efectos inmunomoduladores, ayudando a impulsar la respuesta inmune natural del cuerpo ante las infecciones.[16] También funcionan patógenos resistentes a los antibióticos, como han demostrado numerosos estudios y ensayos clínicos, incluidos organismos multirresistentes como *Staphylococcus aureus, Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*.

Gracias a los avances recientes en bioingeniería – incluida la llegada de CRISPR– se han abierto nuevas posibilidades para mejorar el potencial terapéutico de los fagos. Los científicos pueden modificar y manipular el material genético de los fagos "a la carta", creando nuevos virus todavía más selectivos, más específicos pero, sobre todo, más eficaces. También se puede programar a los fagos para que generen productos con potencial terapéutico in situ, directamente en el lugar donde son necesarios. En este sentido, la bioingeniería de fagos capaces de producir proteínas terapéuticas mejora la eficacia de la terapia, dado que permite modular la respuesta inmune. Además, pueden diseñarse nuevos fagos que mejoren la farmacocinética –la duración de los efectos y potencia de un tratamiento–, aumentando su estabilidad y prolongando su vida útil en



MARÍA JOSÉ ALONSO

Los fagos son virus que se replican dentro de las bacterias, utilizando la maquinaria celular bacteriana para producir más copias de sí mismos. La acción farmacológica de los fagos reside principalmente en su capacidad para infectar y destruir bacterias específicas. Son de interés especial para tratar infecciones bacterianas resistentes a antibióticos.

el cuerpo.[17] Más allá de la ingeniería genética, también pueden combinarse distintos tipos de fagos en los llamados "cócteles de fagos", mezclas con múltiples fagos que atacan diferentes frentes de la infección bacteriana. Estos cócteles no solo mejoran la eficacia del tratamiento, al poder dirigirse al mismo tiempo a múltiples cepas bacterianas, sino que además consiguen reducir el riesgo de desarrollo de resistencia al evitar la propagación de las bacterias.[18]

Las investigaciones más recientes sugieren que los fagos podrían tener utilidad mucho más allá del tratamiento de enfermedades infecciosas, con aplicaciones potenciales en numerosos tratamientos. Por ejemplo, gracias a la cualidad de los fagos para modular las respuestas del sistema inmunitario, podrían utilizarse para tratar enfermedades autoinmunes – muchas de las cuales están creciendo en prevalencia debido a numerosos cambios en el estilo de vida. Varios estudios apuestan por los fagos para atacar de manera selectiva a células inmunitarias implicadas en trastornos autoinmunes como la artritis reumatoide o la enfermedad inflamatoria intestinal. Al eliminar estas células, los fagos podrían ayudar a amortiguar la respuesta inmunitaria –y, quizás más importante todavía, la respuesta inflamatoria– característica de estas afecciones.[19] Los fagos también podrían convertirse en una potente herramienta para luchar contra el cáncer. Mediante la ingeniería genética, podrían modificarse el comportamiento de los virus bacteriófagos para transportar e inyectar cargas terapéuticas directamente dentro de las células cancerosas. Esto podría incluir la distribución de quimioterapia –normalmente sustancias citotóxicas que matan las células cancerosas– e inmunoterapia –el uso de proteínas y anticuerpos que actúan como inmunomoduladoras y estimulan la respuesta natural de nuestro sistema inmunológico contra los tumores.

También podrían usarse fagos en aplicaciones como la terapia génica contra el cáncer, que normalmente utiliza virus más complejos para transportar los fragmentos de ARN y ADN con potencial terapéutico. Esto puede lograrse modificando las proteínas de la superficie del fago, para que sean capaces de reconocer y unirse, de forma específica y selectiva, a ciertos marcadores y receptores de células cancerosas.[20] Ahora que también entendemos mejor las interacciones entre la microbiota intestinal y la aparición de ciertos tipos de cáncer, los fagos podrían diseñarse para atacar poblaciones bacterianas específicas dentro del intestino, si están relacionadas con el crecimiento tumoral o la aparición de metástasis.

A pesar de los prometedores resultados de los últimos estudios con fagos, esta terapia todavía se enfrenta a la incredulidad de muchos, por un lado, y a la falta de fondos y regulación médica, por otro. Hace unos años, un ensayo clínico liderado por investigadores franceses estudió la terapia de fagos en quemaduras infectadasy financiado por la Comisión Europea con 3,8 millones de euros, sin embargo, este estudio tuvo que interrumpirse por culpa de una serie de problemas, entre otros la dificultad para reclutar pacientes y la poca estabilidad de los fagos preparados. Además, los resultados preliminares indicaron que los fagos, efectivamente, ayudaban a reducir la infección bacteriana en algunos pacientes, pero de forma mucho más lenta en comparación con el tratamiento estándar de antibióticos. Este revés podría haber ralentizado la adopción de la terapia con fagos en Francia y, en consecuencia, en el resto de Europa.[21]

Pero todavía hay motivos para el optimismo: Bélgica ha dado un paso significativo al aprobar el uso de los fagos como medicamentos personalizados, preparados por un farmacéutico cualificado, si existe una prescripción médica. Jean-Paul Pirnay, un investigador belga, cree que "solo es una cuestión de tiempo" antes de que la terapia con fagos personalizados se convierta en una opción de tratamiento estándar en todo el mundo.[22] Pirnay y otros científicos del campo sugieren la creación de un nuevo sistema regulatorio que permita el desarrollo de un catálogo de fagos probados y certificados, así como de "semillas" y fagos latentes, ambos necesarios para la creación de preparaciones personalizadas. Queda claro que, a pesar de su gran potencial, las aplicaciones de los fagos se encuentran todavía en una fase preliminar, donde todavía queda mucho camino por recorrer, tanto en investigación y desarrollo, como en regulación y legislación. La inversión en estas terapias es fundamental, especialmente considerando la crisis global de resistencia a los antibióticos ante la que nos encontramos, para poder comprender completamente los mecanismos de acción de los fagos y desarrollar mecanismos eficaces y seguros para su aplicación y su comercialización.[23]

Fases de un ensayo clínico

Fuente: NHS Reino Unido

ENSAYOS DE FASE 1:

A un pequeño número de personas, que pueden ser voluntarios sanos, se les administra el medicamento.

El fármaco se está probando por primera vez en voluntarios humanos.

Los investigadores prueban los efectos secundarios y calculan cuál podría ser la dosis correcta para usar en el tratamiento.

Los investigadores comienzan con dosis pequeñas y solo aumentan la dosis si los voluntarios no experimentan ningún efecto secundario, o si solo experimentan efectos secundarios menores.

ENSAYOS DE FASE 2:

El nuevo medicamento se prueba en un grupo más grande de personas enfermas. Esto sirve para tener una mejor idea de sus efectos a corto plazo.

ENSAYOS DE FASE 3:

Se lleva a cabo con medicamentos que han superado las fases 1 y 2.

El medicamento se prueba en grupos más grandes de personas enfermas y se compara con un tratamiento existente o un placebo para ver si es mejor en la práctica y si tiene efectos secundarios importantes.

Los ensayos a menudo duran un año o más e involucran a varios miles de pacientes.

ENSAYOS DE FASE 4:

La seguridad, los efectos secundarios y la eficacia del medicamento continúan siendo estudiados mientras se utiliza en la práctica.

No es necesario para todos los medicamentos.

Solo se lleva a cabo en medicamentos que han superado todas las etapas anteriores y han recibido licencias de comercialización: una licencia significa que el medicamento está disponible con receta médica.

La difícil transición hacia la medicina con fagos

EN ACCIÓN

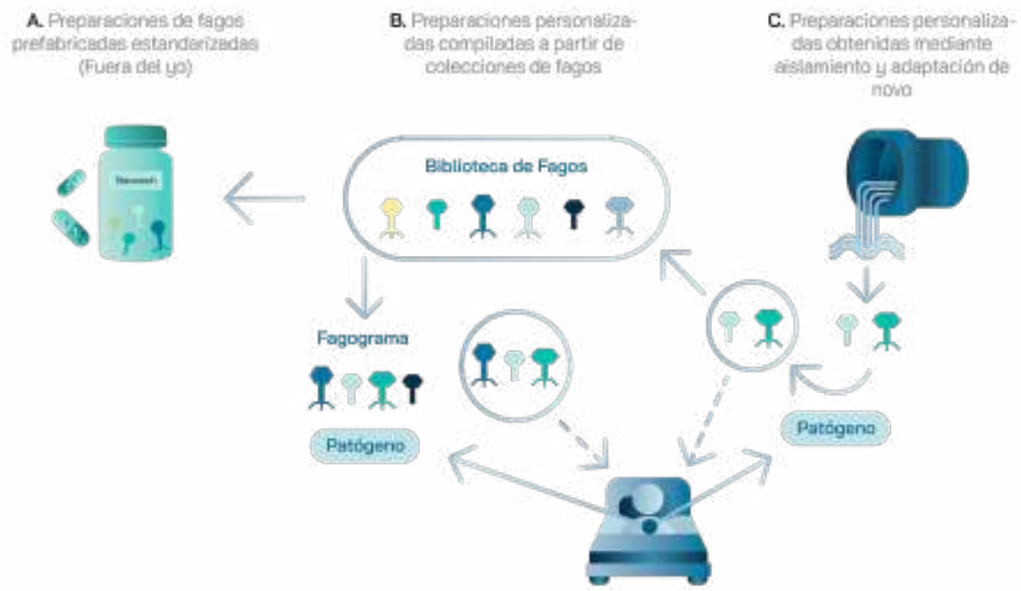
La OCDE estima que los países de la UE y el Espacio Económico Europeo gastarán hasta 1.100 millones de euros al año en atención sanitaria contra la resistencia a los antimicrobianos si no se controla el incremento de la incidencia, incluidos los costes derivados de una recuperación más lenta de la infección y los asociados al mayor riesgo de complicaciones, con hasta 569 millones de euros adicionales por días de hospitalización.[24] El Banco Mundial calcula que la resistencia a los antimicrobianos podría costarle a la economía mundial entre uno y 3,4 billones de dólares al año en 2030.[25] El uso de fagos para combatir estos patógenos se presenta como una de las alternativas más atractivas a las terapias convencionales, pero tiene todavía varios puntos débiles. Para empezar, puede resultar difícil y requerir mucho tiempo de investigación identificar qué patógeno debe erradicarse, qué fago se necesita y su dosis, potencia y capacidad. La interrelación entre un fago, la bacteria y su modificación después de entrar en contacto entre sí y con el medio ambiente, también puede ser particularmente compleja y difícil de determinar. Además, los costes en la formulación y estabilización de preparaciones de fagos de calidad farmacéutica son distintos según las variantes que se utilicen y, al igual que ocurre con los antibióticos, existe la posibilidad de que las bacterias desarrollen resistencia a los fagos. En última instancia, y debido a que los fagos no son antígenos propios, sino que se originan fuera del cuerpo huésped, pueden ser reconocidos por el sistema inmunológico de un paciente y ser atacados, con lo que su eficacia se reduciría, cuando no generarían directamente anafilaxia, una respuesta autoinmune de los pacientes.

A pesar de todo ello, en algunos países, en especial Rusia y sus exsatélies durante la época soviética, las preparaciones de fagos se han convertido en medicamentos registrados, con centros de investigación dedicados.[26] En Georgia, los pacientes son tratados con fagos de fabricación general o con fagos individualizados, si la bacteria es resistente a las variantes estándar. Los productos de fagos también se utilizan para la protección ambiental, el saneamiento y la descontaminación de diferentes ambientes contaminados con patógenos bacterianos. La empresa biofarmacéutica georgiana BioChimPharm completó en 2022 la modernización de su histórica fábrica de bacteriófagos con apoyo económico de la UE, el BERD, la FAO y su Ministerio de Economía y Desarrollo Sostenible.[27] En Polonia, la Unidad de Terapia con Fagos (PTU) del Instituto Hirszfeld de Inmunología y Terapia Experimental en Wrocław ha tratado pacientes desde la década de 1950[28] y se le ha permitido continuar usando fagos en régimen de tratamiento experimental después de unirse a la UE en mayo de 2004. Desde entonces, y hasta 2020, más de 700 pacientes fueron tratados en el PTU.[29] De hecho, los ha venido produciendo para pacientes en toda Europa y Norteamérica. Y las universidades de Jyväskylä y Helsinki llevan mucho tiempo investigando los fagos y, en algunos casos, los han proporcionado para tratamientos de emergencia. A través de su herramienta de inversión Unfund han impulsado PrecisionPhage para respaldar su expansión internacional.[30]

El resto de países de la UE ha dado muestras de interés claras por este campo biomédico en los últimos años, pero la realidad es que, a principios de 2024, no existía ningún medicamento basado en fagos para uso humano aprobado según la legislación de la UE. En Eslovaquia y la República Checa existía uno, Stafal, pero entró en estos países antes de que ambos se unieran a la UE.[31] Cuando se utilizan terapias con fagos en los Estados miembro, generalmente se hace a nivel de experimento individual o como parte de un ensayo clínico. La única excepción sería el enfoque magistral aprobado en Bélgica para facilitar el tratamiento con fagos. Consiste en un documento de tres páginas que "describe cómo producir un fago y realizar un control de calidad", y va firmado por un médico.

Polonia y Bélgica han tomado, por consiguiente, la delantera en la UE. Elegida como la startup de ciencias de la vida más innovadora de Europa en 2021, la belga Vésale Bioscience recibió 1,8 millones de euros del

Preparaciones de fagos estandarizadas, prefabricadas versus personalizadas para la terapia



Fuente: ITAS/KIT

Consejo Europeo de Innovación, para desarrollar su plataforma pionera de terapia que produce fagos personalizados para infecciones bacterianas individuales en un plazo rápido de menos de 24 horas, cumpliendo los requisitos del estándar de Buenas Prácticas de Fabricación (GMP, por sus siglas en inglés).[32] Mientras tanto, Francia y Alemania han optado por el camino más largo y están intentando promover tratamientos estándar, no personalizados, sino con enfoque general, para las infecciones bacterianas.

El *invierno de los fagos* en Estados Unidos y Europa occidental parece estar acabando, pero de forma asimétrica. El surgimiento de los antibióticos en la década de 1920 provocó una disminución del interés y las terapias se limitaron a un pequeño número de centros de tratamiento experimental con médicos e investigadores a título casi individual. En el Reino Unido, se han utilizado sólo en 12 ocasiones en los últimos cuatro años, en dos pacientes con fibrosis quística en el Great Ormond Street Hospital y en 10 pacientes con infección del pie diabético en dos hospitales escoceses.[33] En todos los casos en los que se han probado fuera de la órbita de los países del Este de Europa, los fagos han sido permitidos como productos medicinales sin licencia, o bajo normas nacionales específicas que han permitido que sean recetados por profesionales médicos, pero no fabricados para un uso más amplio, como sucede en Bélgica.

La terapia con fagos ha demostrado ser exitosa en el tratamiento de infecciones potencialmente mortales, con resultados que van desde la eliminación total de la infección hasta la mejora sustancial de la situación del paciente en el caso de afecciones que van desde fibrosis quística y neumonía hasta infecciones protésicas, óseas, articulares y del tracto urinario.[34] Por eso, el Plan de Acción Nacional del Gobierno de EEUU para combatir las bacterias resistentes a los antibióticos, 2020-2025, tuvo que reconocer su potencial curativo e incluyó a los fagos dentro de su llamada a acelerar la investigación básica y aplicada, y a desarrollar nuevas terapias.[35]

El Parlamento Europeo reconoció el gran potencial de los fagos en su Resolución sobre la acción de la UE para combatir la resistencia a los antimicrobianos, pero se limitó a solicitar un marco regulatorio adecuado para el registro de bacteriófagos como aditivos para piensos y como productos médicos veterinarios. En 2023, la Agencia Europea de Medicamentos dio un paso importante en ese sentido al publicar un marco de condiciones para la autorización de fagos como medicamentos para uso con animales. Esa decisión fue aprovechada por la organización PhageEU para reclamar el desarrollo de otros marcos similares, de modo que una amplia gama de

productos de fagos pudiese ingresar en el mercado europeo.[36] En la propuesta de la Comisión Europea para una nueva Directiva sobre medicamentos de uso humano, presentada en abril de 2023, los fagos aparecieron mencionados dentro de esa categoría.[37] En cuanto a la posibilidad de los fagos transgénicos, la UE tiene regulaciones estrictas sobre los organismos genéticamente modificados, lo que podría ofrecer a otros países una ventaja competitiva en el desarrollo y explotación de esta línea de tratamientos.

En el campo regulatorio, sigue habiendo mucho camino por recorrer. En Francia, los fagos se obtienen en una preparación similar de tipo magistral, que proporciona la empresa Pherecydes Pharma o el hospital militar Reina Astrid de Bruselas a un farmacéutico de hospital. La Agencia Nacional de Seguridad de Medicamentos y Productos Sanitarios debe validar el uso de esos fagos a través de un comité de expertos. De acuerdo con la doctrina del TJUE, se puede suponer que la terapia con fagos tiene un efecto farmacológico en el sentido de la ley farmacéutica[38] y, a nivel de la legislación de la UE, no existe ninguna prohibición para la terapia con fagos. Cada Estado miembro es competente para dar luz verde al tratamiento. Eso sí, para armonizar los medicamentos fagos sería necesaria una autorización centralizada obligatoria de la UE y una disposición similar a la exención hospitalaria que garantice que, para los medicamentos fagos individualizados, los requisitos nacionales de trazabilidad y farmacovigilancia y las normas de calidad específicas son equivalentes a los que se aplican a nivel comunitario. Además, debería declararse de forma técnica y jurídicamente inequívoca que son medicamentos biológicos.

Las dudas que genera todavía su despliegue en los sistemas de salud se reflejan en las estimaciones sobre el potencial alcance económico del mercado mundial de terapia con fagos, que oscila entre los 167,71 millones de dólares en 2031, según las previsiones más conservadoras,[39] y los 1.651,8 millones según

las más expansivas[40] al incluir sus aplicaciones en alimentos y bebidas. Los inversores se preguntan por qué deberían poner dinero en una tecnología que ya existe desde hace 100 años, pero que no ha sido adoptada ampliamente fuera de la ex Unión Soviética. Lo que hace diferente al momento actual de otros en el pasado es el análisis genómico, mucho más fácil y barato que en la era soviética, lo que permite a los investigadores seleccionar y diseñar mejor los fagos adecuados.[41]

Puede ser la llave para que se cree el entorno institucional que necesita esta tecnología para escalar. En noviembre de 2022, Innovate UK estableció una Red de Transferencia de Conocimiento sobre Fagos. La Agencia Reguladora de Medicamentos y Productos Sanitarios tenía previsto publicar un borrador de orientación a finales de 2024 sobre la concesión de licencias de productos de fagos, que finalmente podría despejar las dudas sobre su regulación en el Reino Unido. La Colección Nacional de Cultivos Tipo de la agencia de salud británica es la biblioteca de cepas bacterianas más antigua del mundo, y su nuevo depósito pretende ser una fuente fiable al cual los científicos puedan acceder y en el que depositen fagos.[42]

Todo dependerá de que la eficacia clínica quede claramente probada. En mayo de 2024, había 78 ensayos de fagos abiertos en todo el mundo, según Clinicaltrials.gov. En los 59 llevados a cabo entre 2000 y 2021, el 79% de los pacientes con infecciones crónicas y resistentes a los medicamentos mostró una mejoría, mientras que el 87% de las bacterias objetivo fueron erradicadas.[43] Se suele citar el experimento Phagoburn, financiado por la UE, que trabajó en un producto de fagos que contenía bacteriófagos anti-Escherichia coli y anti-Pseudomonas aeruginosa para combatir infecciones en pacientes quemados.[44] Phage Australia lanzó un ensayo clínico innovador para evaluar el protocolo de administración y el seguimiento de la terapia con fagos, un paso más allá de los modelos centrados en fagos individuales o en cócteles. Este enfoque permitiría personalizarlos según las necesidades de cada paciente, al tiempo que estandarizaría la metodología de tratamiento y la recopilación de datos.[45] Sin embargo, otros estudios plantean dudas sobre su éxito como antimicrobianos y recopilan también fracasos elocuentes,[46] incluido un contundente informe de la Scottish Health Technologies Group,[47] o la documentada mejoría y posterior muerte de un paciente tratado con fagos.[48] Las investigaciones realizadas durante décadas en Europa del Este son numerosas, pero no cumplirían con los rigurosos estándares actuales. A esto hay que añadir el bajo nivel de concienciación entre los médicos.[49] Sería necesaria una comprensión más profunda de la biología de los fagos y el rango de huéspedes para desarrollar métodos basados

en fagos más eficaces y herramientas de diagnóstico adecuadas.[50]

Un desafío importante para el desarrollo y uso de fagos es también la falta de capacidad de fabricación, principalmente porque los procesos regulatorios actuales parecen inadecuados para ello. En la mayoría de los países occidentales se les clasifica como un producto farmacéutico que requiere el estándar GMP, y eso implica un proceso de aprobación complejo, costoso y lento. La condición del fago como entidad biológica, que además suele aparecer en cócteles con otros fagos y otros agentes, como antibióticos, susceptible además de modificación genética, no ayuda a simplificar las cosas. Las terapias con fagos suelen diseñarse para tratar infecciones bacterianas específicas e incluso personalizadas para pacientes individuales, lo que contrasta con los productos farmacéuticos fijos asociados al modelo GMP. De ahí que, ante la posibilidad de que los fagos se utilicen de forma amplia, se esté planteando la conveniencia de establecer un régimen de licencias de medicamentos flexible y personalizado, que permita una combinación única de fagos, genéricos y diseñados, a menudo con antibióticos, y que dote a esta tecnología de la seguridad regulatoria necesaria para su producción y fabricación.[51] Probablemente la solución más adecuada pase por promover la producción de GMP a gran escala para fagos genéricos y las soluciones individualizadas para pacientes que requieren combinaciones específicas. Esta tecnología requiere una respuesta ágil, que no contempla la normativa europea actual, según la cual las necesarias actualizaciones periódicas de los cócteles de fagos, para contrarrestar la resistencia de dichos fagos, requerirían de nuevas solicitudes de autorización de comercialización, largas y costosas.[52]

Junto a ello, las compañías farmacéuticas necesitan más incentivos para invertir en una actividad que requiere en una primera fase de 200.000 euros para producir cada fago individual, según el estándar GMP

y, en una etapa más avanzada, de unos 585.000 euros para tratar a entre 100 y 200 pacientes con un solo lote de fagos GMP fabricados por contrato en la UE. En última instancia, Reino Unido estima que en el caso de poner en marcha una instalación GMP, con una inversión de entre 23,5 y 35,2 millones de euros, y teniendo en cuenta las economías de escala, el coste podría reducirse a un par de libras por paciente y se podrían lograr ahorros para el sistema de salud de entre 175 y 230 millones de euros al año, sólo en el tratamiento de las infecciones por pie diabético, cadera y rodilla, gracias al recorte en el uso de antibióticos y la disminución de intervenciones como amputaciones y otras cirugías.[53]

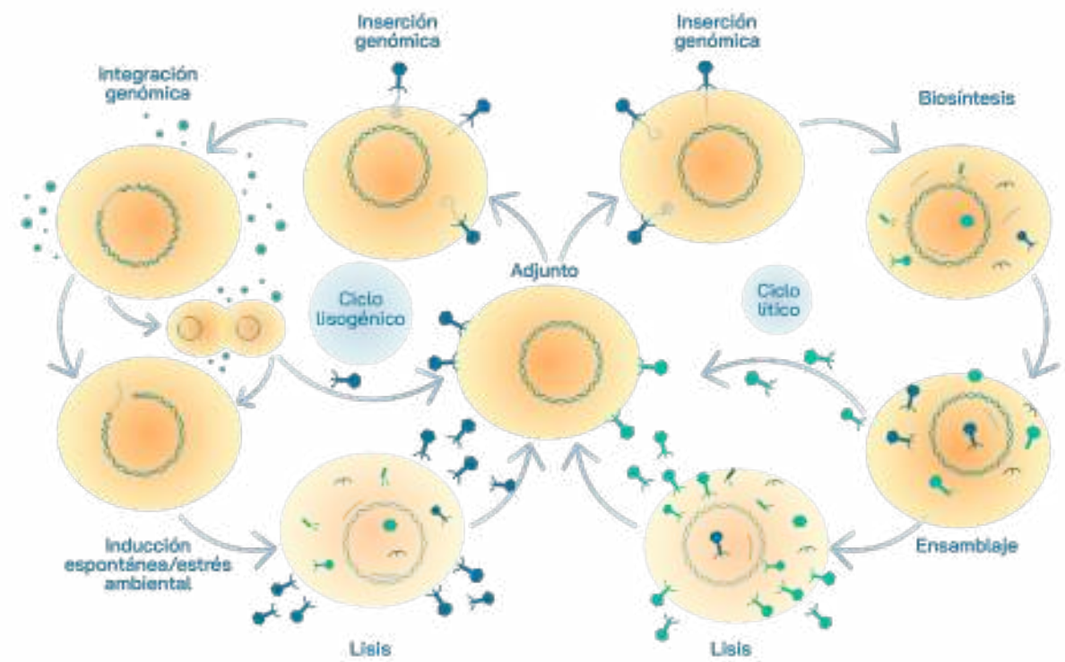
A principios de 2024, sólo Eslovenia, Portugal, Noruega y Estados Unidos contaban con instalaciones de fagos GMP.[54] El Action Plan AMR de 2024 a 2029, que establecía las prioridades de investigación del Gobierno británico, incluía la innovación de nuevos productos para abordar la resistencia a los antimicrobianos.[55] Uno de esos estímulos para el sector podría consistir en facilitar las patentes de combinaciones únicas de fagos y los fagos modificados.[56] También ayudaría el acceso a datos sólidos de ensayos clínicos que ayuden reducir la llamada “brecha de traducción”, es decir, que impulsen el acceso a herramientas de genética molecular, secuenciación y biología computacional, con las que garantizar que los fagos desarrollados para la terapia son seguros y efectivos.

La Organización Mundial de la Salud insiste en aplicar un enfoque One Health y abordar la resistencia a los antimicrobianos desde una perspectiva amplia, que incluya la salud humana y animal, la cadena alimentaria y el medio ambiente. La realidad está todavía muy lejos de hacer posible esa visión a nivel sistémico. Por ejemplo, para que los fagos se transporten de manera eficiente entre países, debería haber un registro bien establecido, regulado y actualizado, pero no es así. La información nacional e institucional se publica hoy esporádicamente en una variedad de revistas científicas. Un enfoque One Health implicaría también la cooperación transdisciplinaria, porque hay mucho que aprender de las investigaciones sobre la aplicación de fagos en la agricultura. Se ha demostrado, entre otras aportaciones de utilidad para el sector sanitario, que el uso de preparaciones de fagos en prácticas previas al sacrificio disminuye la contaminación bacteriana patógena de la carne para consumo humano.[57] En el contexto actual, obtener fagos de alta calidad es difícil, especialmente para quienes no están familiarizados con la terapia. El acceso a los fagos es informal y está impulsado en gran medida por la creación de redes entre médicos y laboratorios de fagos. Se realiza a través de fuentes internacionales dispares, generalmente no comerciales, y depende

del pago por paciente de hasta 12.000 euros para el aislamiento y caracterización de los fagos.[58]

Demasiado riesgo para los inversores. Pese a que el Foro Económico Mundial enumeró el uso de bacteriófagos como una de las 10 principales tecnologías emergentes de 2023,[59] suele ser complicado conseguir financiación para ensayos clínicos, especialmente por parte de las empresas farmacéuticas, debido a su elevado coste especialmente cuando pasan a las fases II y fase III. Y sin ensayos clínicos, los países que no logren información en su territorio tendrán que utilizar los datos clínicos de otros países o de sectores no relacionados con la salud, como el agroalimentario. La FDA está liberando fondos en EEUU y los Institutos Nacionales de Salud destinaron un primer tramo de financiación de 2,5 millones de dólares a 12 institutos de todo el mundo para dinamizar las pruebas. En junio de 2018, se inauguró el Centro de Terapéutica y Aplicaciones Innovadoras de Fagos (IPATH), en la Facultad de Medicina de UC San Diego con el objetivo de brindar terapia con fagos a pacientes con infecciones resistentes a múltiples medicamentos bajo el programa de uso compasivo de la FDA. La startup Armata Pharmaceuticals recibió alrededor de 16,3 millones de dólares del Departamento de Defensa norteamericano, para la investigación del bacteriófago S. aureus, en relación con la resistencia a los antibióticos en Ucrania.[60] El trabajo científico y tecnológico avanza, mientras el ámbito institucional lleva a cabo su propia transición.

Encontrar los fagos adecuados: líticos o templados



Existen dos tipos de fagos: líticos y templados. Los fagos estrictamente líticos infectan a su célula huésped y hacen que estalle, matando así a la bacteria. Los fagos templados, o lisogénicos, no matan a su presa bacteriana directamente, sino que integran su genoma (que puede albergar genes de AMR o toxinas) en la célula huésped. Los fagos líticos (en la imagen, su funcionamiento) se replican dentro de las bacterias y lisan la célula huésped inmediatamente después del ensamblaje. En un ciclo lisogénico, los fagos integran su genoma en el de la célula huésped.

Fuente: ASM Journals

Iniciativas para llegar a la salud desde el campo

ESPAÑA

El único ensayo clínico sobre fagos en el que estaban implicadas entidades españolas de investigación en 2023, según ClinicalTrials,[61] buscaba acreditar la validez de una terapia basada en bacteriófagos para pacientes con fibrosis quística e infección pulmonar crónica por pseudomonas aeruginosa, un tipo de bacteria aeróbica. Estaban presentes el Hospital Vall d'Hebron de Barcelona y el Hospital Clínico Universitario Virgen de la Arrixaca de El Palmar (Murcia), y los participantes debían ser pacientes mayores de edad, clínicamente estables que estuvieran recibiendo medicamentos estándar para la fibrosis quística.

En el ámbito de la ciencia básica, el Grupo de Investigación Traslacional y Multidisciplinar del Instituto de Investigación Biomédica de A Coruña (INIBIC) del Hospital A Coruña ha desarrollado diversas líneas de innovación en fagoterapia, y ha sido premiado por la asociación de empresas de biotecnología Asebio por la aplicación de la estrategia de anti-persistencia bacteriana, el principal mecanismo que utilizan las bacterias para defenderse de la infección por fagos. Su trabajo se centra en la eficacia de los fagos líticos naturales combinados con tratamientos potenciadores, y el desarrollo de fagos sintéticos que porten proteínas de interés para favorecer su actividad.[62]

En España, es más habitual encontrar investigación acerca de los fagos en el ámbito agroalimentario, una vertiente que, como se ha visto, puede ofrecer posibilidades de aplicación posterior a humanos. El proyecto C-SNIPER busca obtener una solución basada en bacteriófagos innovadora, natural y eficiente para reducir la prevalencia del Campylobacter en aves de corral.[63] Es causante de la campilobacteriosis, la enfermedad transmitida por alimentos más frecuente en Europa y la ruta más común de infección humana, con un coste asociado estimado de 2.400 millones de euros al año.[64] Pese a ello, no hay en el mercado productos a base de fagos que la combatan, como sí sucede con otros patógenos alimentarios como la Listeria monocytogenes, la Escherichia coli y la Salmonella. Las medidas de control actuales, basadas en el uso de antibióticos en las granjas, están provocando la propagación de cepas de Campylobacter multirresistentes. Por eso, la entidad europea EIT Food decidió financiar el proyecto C-SNIPER, en el que participan el centro científico y tecnológico español AZTI, el Instituto de Reproducción Animal e Investigación Alimentaria PAS (Polonia), la Universidad de Turín, el Phage Technology Center y ORA Società Agricola.

Investigadores de la Universitat Autònoma de Barcelona, formaron parte asimismo del proyecto europeo PhagoVet para desarrollar tres productos a partir de bacteriófagos para luchar contra la Salmonella y la Escherichia coli que supongan una alternativa al uso de antibióticos en producción animal. propone el uso de bacteriofagos para el control de los mencionados patógenos en producción aviar.

Relación de notas

[1] OMS (2023). "**Antimicrobial resistance**". Consultado el 03/05/2024.

[2] J O'Neill et al. "**Antimicrobial Resistance: Tackling a crisis for the health and wealth of nations.**" Publicado en diciembre de 2014, consultado el 03/05/2024.

[3] F D'Herelle. Research in Microbiology, 2007, 158, 7, 553, DOI: **10.1016/j.resmic.2007.07.005**

[4] Pearly Jacob. "**The viruses that prey on human diseases**". BBC Future. Publicado el 18/01/2021, consultado el 03/05/2024.

[5] Ernesto Diéguez Casal. "**El retorno de los fagos**". Principia Magazine. Publicado el 14/09/2015, consultado el 03/05/2024.

[6] Betty Kutter. **"Our First Adventure With Phage Therapy: Alfred's Story"**. Evergreen Lab. Consultado el 03/05/2024.

[7] NJ Anyaegbunam et al. Microbiological Research, 2022, 264, 127155, DOI: **10.1016/j.micres.2022.127155**

[8] "**¿Cómo funcionan los antibióticos?"** Infosalus. Publicado el 18/08/2014, consultado el 03/05/2024.

[9] Karen Steward. "**Lytic vs Lysogenic – Understanding Bacteriophage Life Cycles**". Technology Networks: Immunology & Microbiology. Publicado el 28/08/2018, consultado el 03/05/2024.

[10] WN Chaudhry et al. PLoS One, 2017, 12, 1, e0168615, DOI: **10.1371/journal.pone.0168615**

[11] NH Naraismhaiah et al. Advanced Microbiology, 2013, 3, 1, 52, DOI: **10.4236/aim.2013.31008**

[12] C Brives y J Pourraz. Palgrave Communications, 2020, 6, 100, DOI: **10.1057/s41599-020-0478-4**

[13] B Johnson. Nature Biotechnology, 2023, 41, 438, DOI: **10.1038/s41587-023-01732-9**

[14] JM Borin et al. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118, 23, e2104592118, DOI: **10.1073/pnas.2104592118**

[15] A Singh et al. Infection and Drug Resistance, 2022, 15, 503, DOI: **10.2147/IDR.S348700**

[16] M Cafora et al. Journal of Cystic Fibrosis, 2021, 20, 6, 1046, DOI: **10.1016/j.jcf.2020.11.017**

[17] J Du et al. Nature Communications, 2023, 14, 4337, DOI: **10.1038/s41467-023-39612-0**

[18] AD Teklemariam et al. Biotechnology and Genetic Engineering Reviews, 2023, 1, DOI: **10.1080/02648725.2023.2178870**

[19] A Górski et al. Clinical Infectious Diseases, 2023, 77, S5, 433, DOI: **10.1093/cid/ciad483**

[20] MS Islam et al. Frontiers in Oncology, 2023, 13, 1290296, DOI: **10.3389/fonc.2023.1290296**

[21] P Jault et al. The Lancet Infectious Diseases, 2019, 19, 1, 35, DOI: **10.1016/S1473-3099(18)30482-1**

[22] UK Parliament (2024). "**The antimicrobial potential of bacteriophages**". Publicado el 03/01/2024, consultado el 03/05/2024.

[23] David Matthews. **"Call for more funding and flexible regulatory framework for phage R&D"**. Science Business. Publicado el 09/01/2024, consultado el 03/05/2024.

[24] **Antimicrobial Resistance: Tackling the Burden in the European Union**, OCDE, 2019

[25] **Drug-Resistant Infections: A Threat to Our Economic Future**, Banco Mundial, marzo de 2017

[26] Ryszard Międzybrodzki et al., Current Updates from the Long-Standing Phage Research Centers in Georgia, Poland, and Russia, Bacteriophages, febrero de 2018, doi.org/**10.1007/978-3-319-40598-8_31-1**

[27] "**Innovative Georgian pharma company opens new manufacturing facility with EU support**", euneighbourseast.eu, 20 de diciembre de 2022

[28] Andrzej Górski et al., How Interest in Phages Has Bloomed into a Leading Medical Research Activity in Poland, Viruses, diciembre de 2022, doi: **10.3390/v14122617**

[29] Maciej Żaczek et al., Phage Therapy in Poland – a Centennial Journey to the First Ethically Approved Treatment Facility in Europe, Frontiers in Microbiology, junio de 2020, doi.org/**10.3389/fmicb.2020.01056**

[30] "**Unifund sijoittaa faagiteknologiaa kehittävään bioteknologiayhtiö PrecisionPhageen**", University of Jyväskylä, 8 de febrero de 2023

[31] Faltus T. The Medicinal Phage—Regulatory Roadmap for Phage Therapy under EU Pharmaceutical Legislation, Viruses, 12 de marzo de 2024, doi.org/**10.3390/v16030443**

[32] **https://phage.health/about-us/**

[33] Joshua D Jones et al., The Future of Clinical Phage Therapy in the United Kingdom, Viruses, marzo de 2023, doi: **10.3390/v15030721**

[34] Diana P. Pires et al., **Current challenges and future opportunities of phage therapy**, FEMS Microbiology Reviews, 2020

[35] National action plan for combating antibiotic-resistant bacteria 2020–2025, Federal Task Force on Combating Antibiotic-Resistant Bacteria, octubre de 2020

[36] "**PhageEU Manifesto for European Parliament Elections 2024**", Phage EU

[37] Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Union Code Relating to Medicinal Products for Human Use, and Repealing Directive 2001/83/EC and Directive 2009/35/EC, COM/2023/192 final, 2023/0132(COD), Comisión Europea, 2023

[38] Court of Justice of the European Union. Judgment, 06.09.2012, **C-308/11, margin 31, 36**.

[39] Phage Therapy Market Size, Share, Growth, and Industry Growth by Type (DsDNA Bacteriophage, SsDNA Bacteriophage, SsRNA Bacteriophage, and Others), By Application (Animal Health, Aquaculture, Agriculture, Food Industry, Human Health, and Others), Regional Forecast To 2031, Business Research, febrero de 2024

[40] Bacteriophage Therapy Market Analysis, Coherent Market Insights, septiembre de 2023

[41] David Matthews, "**Antimicrobial resistance triggers race to develop phage alternatives**", Science Business, 24 de noviembre de 2022

[42] "**How bacteria-munching viruses could offer an alternative to antibiotics**", UK Health Security Agency, 12 de marzo de 2024

[43] Saartje Uyttebroek, MD, Safety and efficacy of phage therapy in difficult-to-treat infections: a systematic review, The Lancet Infectious Diseases, marzo de 2022, DOI: **10.1016/S1473-3099(21)00612-5**

[44] Patrick Jault et al. Efficacy and tolerability of a cocktail of bacteriophages to treat burn wounds infected by Pseudomonas aeruginosa (PhagoBurn): a randomised, controlled, double-blind phase 1/2 trial, The Lancet, doi.org/**10.1016/S1473-3099(18)30482-1**, 3 de octubre de 2018

[45] The unregulated potential of phages, The Lancet Microbe, marzo de 2023, doi.org/**10.1016/S2666-5247(23)00043-5**

[46] Yan D. Niu et al., Efficacy of Individual Bacteriophages Does Not Predict Efficacy of Bacteriophage Cocktails for Control of Escherichia coli O157, Frontiers in Microbiology, febrero de 2021, doi.org/**10.3389/fmicb.2021.616712**

[47] Bacteriophage therapy for patients with difficult to treat bacterial infections: Recommendations for NHS Scotland, Healthcare Improvement Scotland y SHTG, febrero de 2023

[48] Stellfox ME et al. Bacteriophage and antibiotic combination therapy for recurrent Enterococcus faecium bacteremia, mBio, 2024, doi.org/**10.1128/mbio.03396-23**

[49] Joshua D. Jones et al.

[50] Vishnu Kirthi Arivarasan, "**Unlocking the potential of phages: Innovative approaches to harnessing bacteriophages as diagnostic tools for human diseases**", en Phage Therapy-B, Elsevier, 2023

[51] "**The antimicrobial potential of bacteriophages**", Parlamento de Reino Unido, 3 de enero de 2024

[52] Harald König, Arnold Sauter, Bacteriophages in medicine, agriculture and food industry – application perspectives, innovation and regulatory issues, Oficina de Evaluación Tecnológica del Bundestag alemán (TAB), julio de 2023 doi: 10.5445/IR/1000161932

[53] Ibíd.

[54] David Matthews, Call for more funding and flexible regulatory framework for phage R&D, Science Business, 9 de enero de 2024

[55] "**Government's response to the Science, Innovation and Technology Committee's report 'The antimicrobial potential of bacteriophages'**", Gobierno de Reino Unido, 1 de marzo de 2024

[56] Laurent Bretaudeau et al., Good Manufacturing Practice (GMP) Compliance for Phage Therapy Medicinal Products, Frontiers in Microbiology, junio de 2020.

[57] Hitchcock NM et al. Current Clinical Landscape and Global Potential of Bacteriophage Therapy, Viruses, 21 de abril de 2023, doi: **10.3390/v15041020**

[58] Suleman M, Clark JR, Bull S, et al. Ethical argument for establishing good manufacturing practice for phage therapy, UK Journal of Medical Ethics, 11 de febrero de 2024. doi: **10.1136/jme-2023-109423**

[59] Sarah Mikesell, "**Proteon Pharmaceuticals: Pioneering bacteriophage technology for global health challenges**", thepoultrysite.com, 27 de septiembre de 2023

[60] Deborah Balthazar, "**Phage therapy: Researchers sharpen another arrow in the quiver against antibiotic resistance**", statnews.com, 20 de febrero de 2024

[61] clinicaltrials.gov

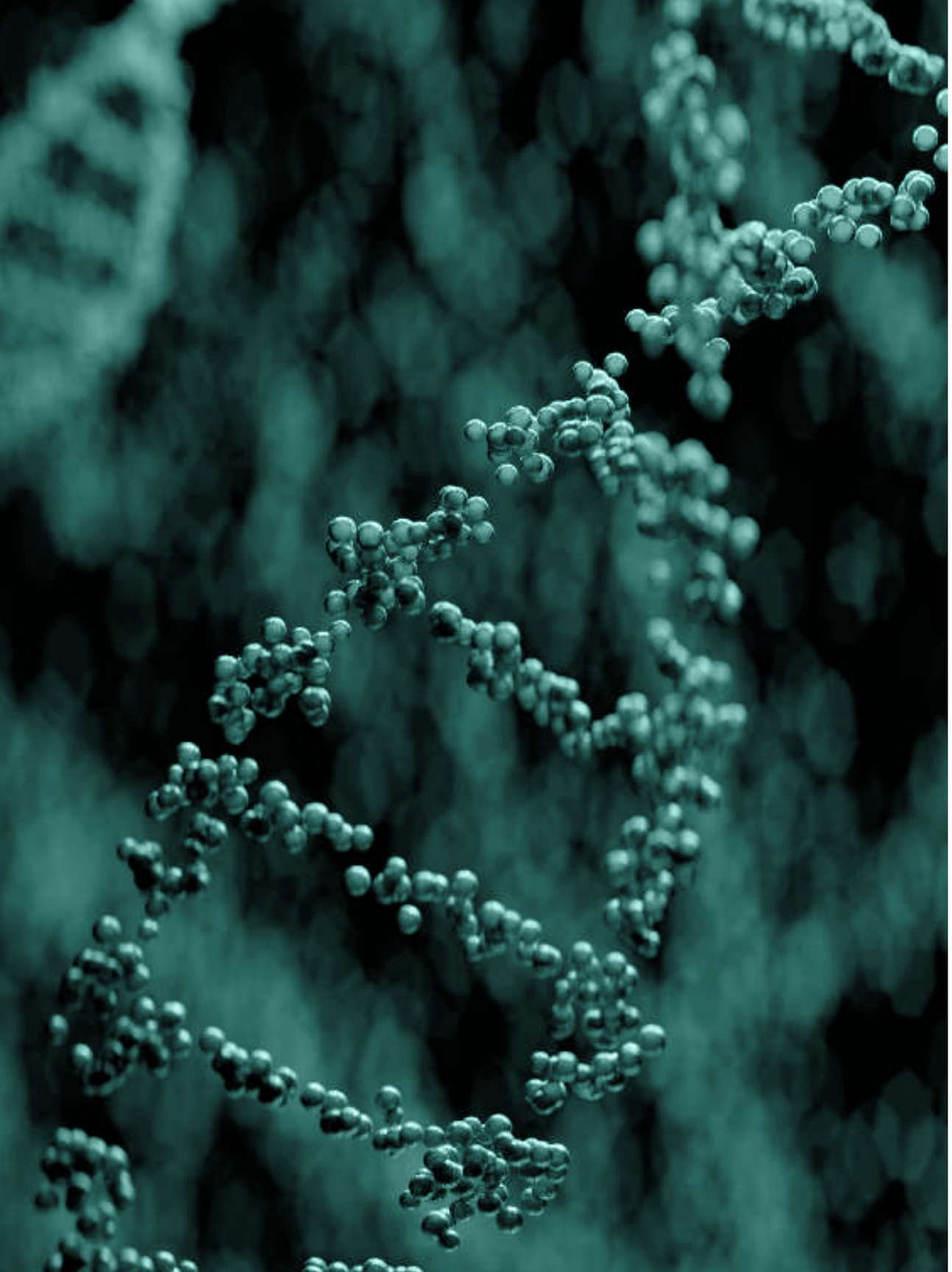
[62] "**Un proyecto innovador contra la resistencia bacteriana y una vacuna protectora para las abejas, ganadores de los Premios Zendal**", ASEBIO, 21 de noviembre de 2023

[63] "**Consumers and producers in favour of using phages as an alternative to antibiotics in the fight against Campylobacter in poultry**", EIT Food, 25 de marzo de 2021

[64] "**The European Union One Health 2019 Zoonoses Report**", European Food Safety Authority, 27 de febrero de 2021, https://doi.org/10.5281/zenodo.4298993

04

Técnicas CRISPR



CRISPR sale del laboratorio

La tecnología genética CRISPR es mundialmente famosa. Las científicas que se encuentran detrás de su desarrollo, la francesa Emmanuelle Charpentier y la estadounidense Jennifer Doudna, han recibido prestigiosos galardones, incluido el Premio Princesa de Asturias de Investigación en 2015 y el Premio Nobel de Química en 2020. CRISPR permite "cortar y pegar" fragmentos de código genético de una forma muy precisa, pero además muy rápida y eficiente. Esta capacidad de editar el ADN ha abierto nuevas puertas en campos como la investigación biomédica, la agricultura, la biotecnología y la medicina. Gracias a CRISPR, los científicos pueden estudiar la función de genes específicos y, además, corregir mutaciones genéticas, desarrollar terapias para tratar enfermedades, mejorar cultivos agrícolas y diseñar nuevos modelos para la investigación de patologías.[1] El origen de esta tecnología revolucionaria –y el del acrónimo CRISPR– se encuentra en Alicante, donde el investigador ilicitano Francis Mojica descubrió unas secuencias de ADN repetitivas que parecían fundamentales para la viabilidad de las células. Era una especie de sistema inmunitario de las bacterias, para protegerse de infecciones virales. El propio Mojica reveló que "las posibilidades (de CRISPR) son enormes y las sorpresas que quedan por delante extraordinarias". Sin embargo, la falta de financiación y apoyo por parte de las instituciones públicas y privadas en España provocó que el desarrollo y el avance de esta tecnología tuviera lugar en otros rincones del planeta.[2]

Las 'tijeras' genéticas conquistan el cuerpo

POR DENTRO

El descubrimiento de CRISPR se remonta a principios de la década de 1990, cuando el microbiólogo español Francisco Mojica descubrió una serie de secuencias repetitivas en el ADN de unas bacterias extremófilas, en particular unas bacterias adaptadas a vivir en ambientes de alta salinidad. Normalmente, el ADN es una secuencia de código diverso, un libro con las instrucciones que necesitan las células para fabricar proteínas. Las repeticiones observadas por Mojica eran una anomalía. Además, presentaban la curiosidad de ser prácticamente palindrómicas: podían leerse del derecho y del revés. En 1993, publicó un artículo en el que identificaba estas secuencias repetitivas y las bautizaba como "repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas", también abreviado como CRISPR, por sus siglas en inglés.[3] Aunque al principio este descubrimiento pasó desapercibido, una década después la comunidad científica comenzó a interesarse por el origen y las razones evolutivas que se encontraban detrás de estas misteriosas secuencias palindrómicas.[4] En 2007, varios científicos descubrieron que las secuencias CRISPR formaban parte del sistema inmunitario de las bacterias, que utilizaban esta tecnología genética para 'aprender' a luchar contra los virus y resistir las infecciones.[5]

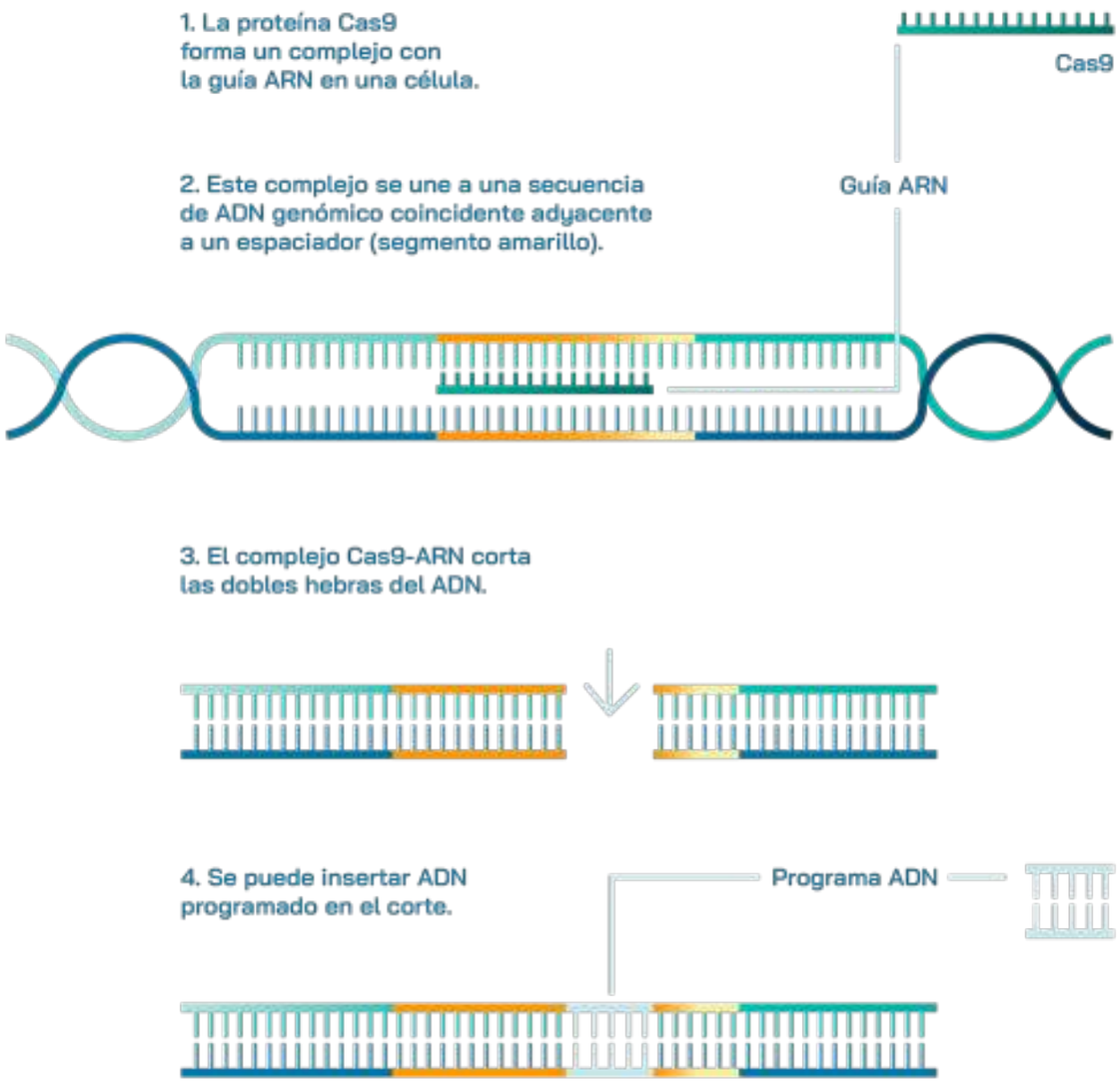
Poco después, llegó la verdadera revolución. A comienzos de la década de 2010, los científicos empezaron a explotar el mismo sistema CRISPR que utilizan las bacterias para protegerse como una herramienta de edición del genoma. En 2012, las investigadoras Jennifer Doudna y Emmanuelle Charpentier, galardonadas pocos años después con el Premio Nobel de Química, publicaron un artículo revolucionario en el que describían cómo podían reprogramar el sistema CRISPR para "cortar y pegar" secuencias específicas de ADN en el laboratorio.[6] Doudna y Charpentier demostraron que podían diseñar una guía de ARN para dirigir a una enzima, llamada Cas9, a secuencias específicas de ADN, para luego cortarlas con una precisión sin precedentes. Este proceso permitió a los científicos editar el genoma con una facilidad y precisión únicas. Desde entonces, la tecnología CRISPR ha experimentado un desarrollo vertiginoso, hasta el punto de que ya existen tratamientos eficaces para humanos con enfermedades genéticas como la anemia falciforme, desarrollado por la empresa farmacéutica Vertex y autorizado por las agencias reguladoras de Reino Unido y Estados Unidos.[7] Además, se han desarrollado varias variantes de la técnica original, con enzimas más avanzadas como CRISPR-Cas12 y CRISPR-Cas13, que permiten editar el genoma con una mayor precisión y eficiencia.

Uno de los hitos más importantes en la historia de CRISPR fue la primera demostración en la edición del genoma de células humanas. En 2013, un equipo de científicos dirigido por Feng Zhang, del Instituto Broad en Estados Unidos, publicó un artículo en el que describían esta tecnología y demostraban que podían conseguirse modificaciones genéticas en apenas un par de semanas. Este avance abrió nuevas posibilidades para la investigación médica y el desarrollo de terapias génicas.[8]

Otro hito importante en la investigación de CRISPR fue la aplicación de la tecnología para corregir mutaciones genéticas en modelos animales. En 2014, un equipo de científicos dirigido por Kathy Niakan, del Laboratorio de Biología Molecular en Reino Unido, utilizó CRISPR para corregir una mutación genética en embriones de ratón, y demostró que CRISPR podría utilizarse para tratar enfermedades genéticas hereditarias. Pocos años después, este mismo equipo utilizó esta tecnología en embriones humanos, gracias al permiso de las autoridades sanitarias inglesas.[9] La posibilidad de modificar la secuencia genética de embriones humanos ha generado una gran polémica en la comunidad científica internacional, debido a las implicaciones éticas y filosóficas de poder programar personas "a la carta" mucho más allá de simplemente borrar algunos problemas hereditarios.[10]

A pesar de los retos de regulación y los dilemas éticos, la investigación de CRISPR ha continuado avanzando a un ritmo vertiginoso. Como veremos más adelante, se han desarrollado nuevas aplicaciones de la tecnología, como la edición del genoma en plantas, la modificación de la microbiota intestinal y la detección de enfermedades infecciosas. Además, los científicos están explorando la posibilidad de utilizar CRISPR para desarrollar terapias génicas

¿Cómo funciona CRISPR?



Fuente: MRS Bulletin

para una amplia variedad de enfermedades más allá de la anemia falciforme, desde el cáncer hasta las enfermedades genéticas raras.

Claramente, la tecnología de edición genética CRISPR-Cas9 ha revolucionado el campo de la biotecnología y, pronto, transformará la medicina de precisión, gracias a su capacidad para editar el ADN de manera precisa y eficiente. Pero ¿cómo funciona exactamente esta poderosa herramienta? La clave es una proteína llamada Cas9, que actúa como una tijera molecular, capaz de cortar fragmentos de ADN. Guiada por una sencilla hebra de ARN, conocida como ARN guía, la proteína Cas9 puede localizar y cortar el ADN con precisión. A partir de esta ingeniosa solución del sistema inmunitario de las bacterias, los científicos han creado un sistema de "corta y pega" capaz de editar el ADN de células humanas, animales y vegetales. En lugar de dirigirse al genoma de un virus, como ocurriría de forma natural en las bacterias, el ARN guía sintetizado en el laboratorio dirige a Cas9 hacia una secuencia específica de ADN en el genoma.[11]

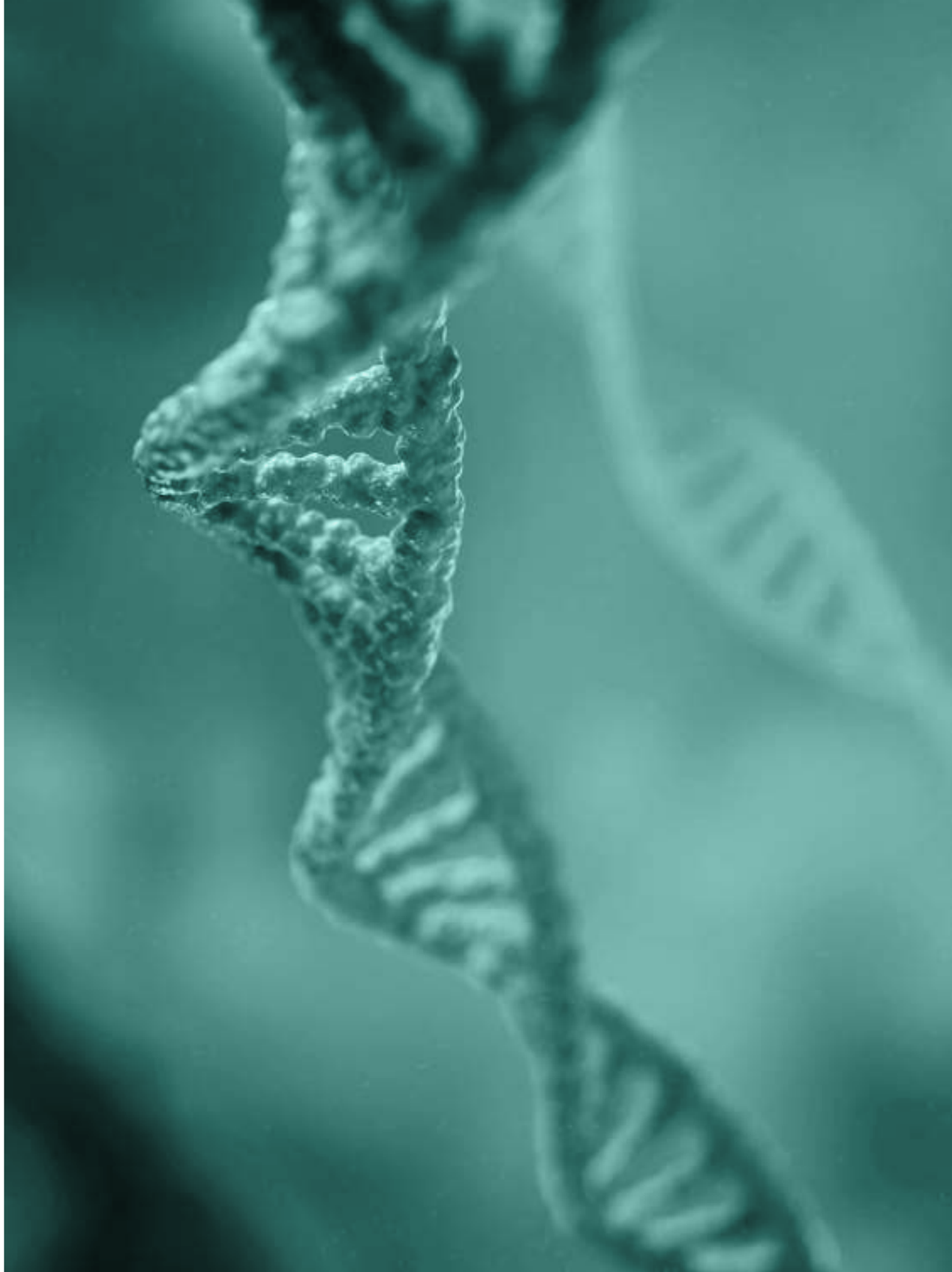
Así pues, la tecnología CRISPR consta de dos componentes principales: el ARN guía y la proteína Cas9. El ARN guía es una molécula de ARN –como las utilizadas en algunas de las vacunas contra la COVID-19– diseñada para ser complementaria a la secuencia específica de ADN que se desea editar. De este modo, la secuencia de ARN guía y la secuencia de ADN a editar encajarán como una llave en una cerradura. Una analogía que probablemente sea más visual y acertada sean las dos cintas de una cremallera. El ARN guía se une a la proteína Cas9 formando un complejo que recorre y "escanea" el genoma en busca de una secuencia de ADN que coincida con la secuencia complementaria de la guía. Una vez estos dos fragmentos se encuentran, la proteína Cas9 deja de moverse a lo largo de la cadena de ADN y empieza a funcionar como una enzima capaz de cortar el código genético. En ocasiones, los expertos se refieren a esta enzima como una "tijera molecular" que corta el ADN en el sitio específico definido por el ARN guía. Una vez que el complejo Cas9-ARN guía se ha unido al ADN objetivo, la proteína Cas9 corta ambos filamentos de ADN, creando una ruptura de doble cadena en el ADN. A continuación, son los propios mecanismos de reparación que tiene de forma natural la célula los que entran en juego.

Estos sistemas incluyen, entre otros, la reparación por unión de extremos no homólogos y la reparación por recombinación homóloga. El primero simplemente une los extremos rotos del ADN. El segundo, en cambio, es mucho más interesante, porque la célula utiliza una molécula de ADN homóloga como plantilla para reparar la rotura ocasionada por Cas9. Esto permite a los científicos insertar o reemplazar secuencias específicas de ADN en el genoma. Una de las características más impresionantes de

CRISPR-Cas9 es su precisión y eficiencia. Entre otras cosas, puede cortar el ADN en el sitio objetivo con una eficacia superior al 90%.[12]

Todos los seres vivos tienen un genoma. Bacterias, hongos, plantas, animales y seres humanos usamos las mismas herramientas moleculares para guardar las instrucciones de la vida. Esto implica que las aplicaciones de CRISPR son prácticamente infinitas. La tecnología puede utilizarse para editar el genoma de plantas para hacerlas más nutritivas –o incluso más productivas y resistentes ante los problemas que crea el cambio climático–, para parar la transmisión de enfermedades genéticas hereditarias, para crear nuevas herramientas en nuestra lucha contra las bacterias y, especialmente, las bacterias resistentes, y para editar el genoma de los embriones humanos.[13] Esto último tiene unas implicaciones éticas muy complejas, pero podría ayudar a erradicar enfermedades como la hemofilia, la fibrosis quística y muchas otras.[14]

En agricultura, los científicos están empezando a estudiar las aplicaciones de CRISPR para editar los genes de diferentes cultivos y hacerlos más sabrosos, nutritivos, incluso más resistentes a las inclemencias meteorológicas y al estrés, dos factores que aumentarán el riesgo conforme avance la crisis climática. Por ejemplo, podría utilizarse CRISPR para reducir la cantidad de agentes alérgenos en los cacahuetes o permitir que los plátanos sobrevivan a una enfermedad mortal causada por hongos patógenos. Recientemente, grandes empresas multinacionales como Monsanto y DuPont han comenzado a comprar licencias para explotar la tecnología CRISPR y desarrollar nuevas variedades de cultivos más interesantes, para complementar su investigación en técnicas tradicionales de organismos modificados genéticamente. Frente a estas técnicas desarrolladas en las décadas de 1970 y 1980, CRISPR ofrece una alternativa de edición genética mucho más rápida, precisa y versátil, que puede ayudar a identificar genes asociados con características deseables de una forma más eficaz.[15]



JAVIER GARCÍA

|

Técnicas de edición precisa, como CRISPR-Cas9, son un elemento clave a la hora de abordar retos estructurales de España y mejorar su competitividad. Por ejemplo, en agricultura, CRISPR permite desarrollar cultivos más resistentes a la sequía y a las plagas, desafíos críticos en el contexto del cambio climático y la gestión limitada de los recursos hídricos en el país. En el ámbito de la salud, CRISPR ofrece la posibilidad de desarrollar tratamientos personalizados para enfermedades genéticas, lo que sin duda contribuye a impulsar la innovación biomédica en nuestro país y a posicionar a España como líder en una industria emergente basada en terapias avanzadas de edición genética.

CRISPR también acelera la detección y el tratamiento de enfermedades genéticas, con casos como la edición del genoma para eliminar la miocardiopatía hipertrófica, la enfermedad de Huntington, la fibrosis quística y las mutaciones BRCA-1 y 2, relacionadas con los cánceres de mama y ovario. Sin embargo, hasta ahora, la única aplicación aprobada de la tecnología CRISPR es el tratamiento de la anemia falciforme, un problema genético y hereditario que afecta los glóbulos rojos, dándoles una forma de hoz en lugar de la forma normal, redonda, lo que ocasiona varios problemas de salud. Este es un caso especial, porque tan solo necesita la edición de una "letra" del ADN y puede aplicarse directamente en adultos. De momento, la tecnología ha visto que reduce los problemas y el dolor en más de 100 pacientes durante al menos un año, aunque se desconocen los efectos a largo plazo.[16] Aún quedan obstáculos que superar antes de que alguien comience otros ensayos clínicos en humanos, para el tratamiento de enfermedades más complejas. Por ejemplo, las enzimas Cas9 pueden ocasionalmente "fallar" y editar el ADN en lugares inesperados, lo que podría desembocar en cáncer o incluso crear nuevas enfermedades. Algunos expertos creen que la capacidad de CRISPR para causar estragos y problemas serios en el ADN ha sido "gravemente subestimada".[17] Actualmente, los estudios científicos se centran en identificar estos problemas, implementar las terapias de forma paulatina y con precaución y desarrollar nuevos avances que mejoren todavía más la precisión y la seguridad a largo plazo de la tecnología CRISPR.[18] Entre otros avances, se desarrollan nuevas proteínas y enzimas similares a Cas9, como Cas12 y Cas13, que solucionan algunos de estos inconvenientes y otorgan más precisión a los sistemas de edición genética.

La lucha contra las bacterias resistentes a los antibióticos y las enfermedades infecciosas, como el virus del Zika, cuya incidencia no deja de crecer por los efectos de la crisis climática, también podría abordarse con CRISPR. En el primer ejemplo, la edición genética podría puentear el desarrollo de nuevos antibióticos, gracias al desarrollo de nuevas estrategias de ataque que modifiquen el ADN de los patógenos. Estas técnicas también se están utilizando contra infecciones víricas como el sida y las infecciones por herpes. Asimismo, podría utilizarse CRISPR en técnicas de "ingeniería dirigida" para modificar el código genético no solo de un organismo, sino de toda una especie a través de la propagación y la herencia. Esto permitiría, por ejemplo, modificar genéticamente los mosquitos, vectores de enfermedades como el Zika, o la malaria, para que solo produzcan descendencia masculina. Con el tiempo, la población se extinguiría. También podrían hacerse mosquitos resistentes a los parásitos, para prevenir la transmisión de enfermedades a otras especies, incluidos los humanos.[19]

Más recientemente se han presentado resultados prometedores que utilizan CRISPR para mejorar las terapias contra el cáncer, de forma que consiguen aumentar la eficacia a través de la reprogramación genética para conseguir unos tratamientos más personalizados. En un estudio clínico inicial con 16 pacientes con diferentes tipos de cáncer, como cáncer de colon, mama y pulmón, un grupo de científicos liderados por el español Antoni Ribas, utilizó CRISPR para mejorar la inmunoterapia contra estos tumores. Gracias a las ediciones genéticas, los científicos pudieron reprogramar el sistema inmunitario de los pacientes para que atacara específicamente las células cancerosas, dejando intactas a las células sanas. Este avance ofrece una nueva esperanza en la lucha contra el cáncer. De forma natural, nuestro sistema inmunitario lucha contra células cancerosas cada día. El problema es que, a medida que el cáncer crece, la capacidad de combatir contra la enfermedad disminuye de manera progresiva. Esta tecnología, sin embargo, consigue aislar los receptores y anticuerpos específicos para las células cancerosas en muestras de sangre y, tras un análisis exhaustivo, utiliza CRISPR para programar al resto de células del sistema inmunitario, que "aprenden" a crear los mismos anticuerpos y consiguen destruir el cáncer de forma más precisa y más eficaz. Este enfoque personalizado, al utilizar las propias células y receptores del paciente, reduce el riesgo de efectos secundarios y aumenta la probabilidad de éxito del tratamiento.[20]

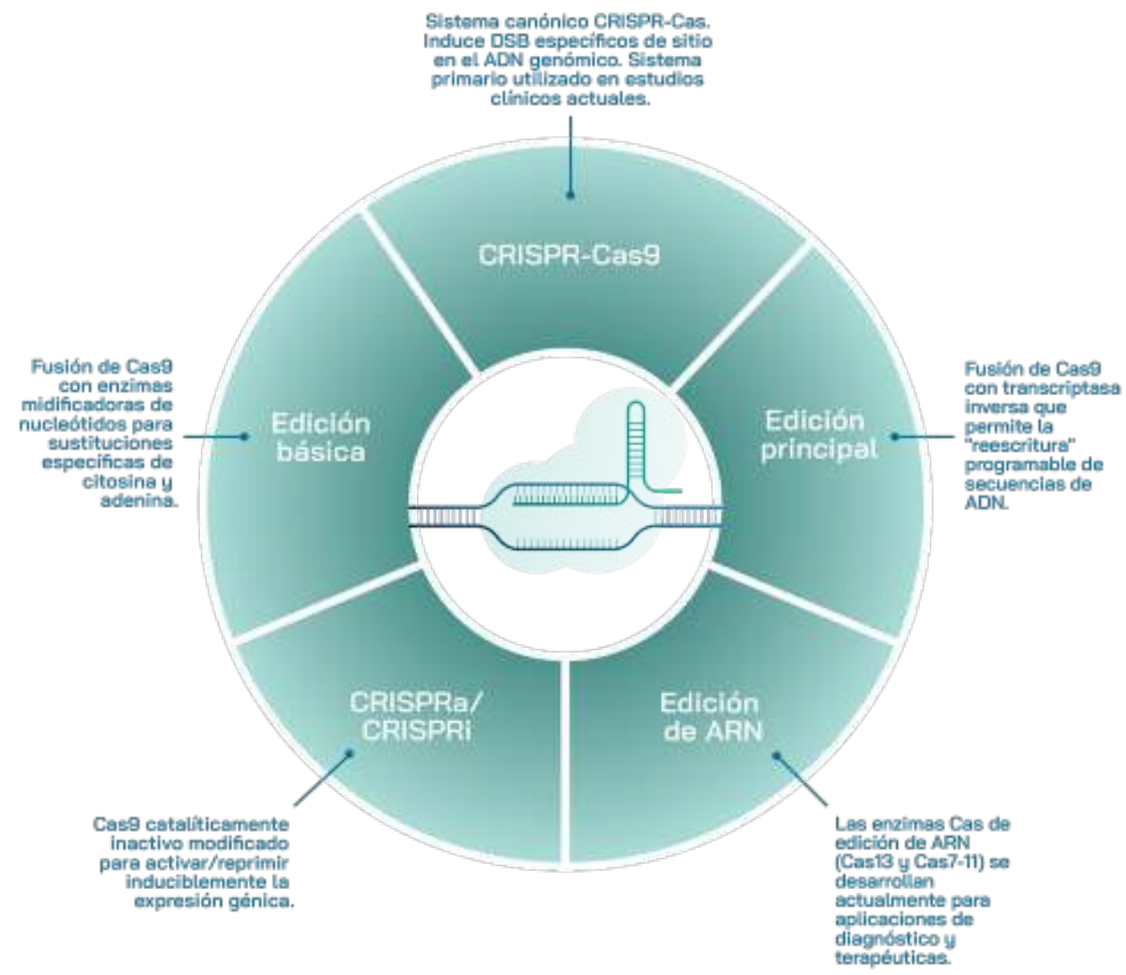
A pesar del gran potencial de esta tecnología para revolucionar la agricultura, la biotecnología y los tratamientos de medicina de precisión, CRISPR plantea una serie de desafíos éticos, sociales y técnicos que deben abordarse de manera rigurosa. En primer lugar, en cuanto a las consideraciones éticas, la capacidad de editar el genoma –especialmente el genoma humano– con tecnologías como CRISPR-Cas9 y sus versiones mejoradas plantea una serie de preguntas difíciles.[21] Por ejemplo, surgen debates sobre el uso y la modificación de embriones humanos, dado que además de la corrección de problemas relacionados con la salud, podrían alterarse

otros factores como la inteligencia o la apariencia física, un concepto que roza los horrores de la eugenesia y la selección artificial. Estas ediciones genéticas podrían alterar la diversidad genética de la especie –una de las principales ventajas evolutivas[22]– y abrir la puerta a la "ingeniería" de seres humanos, un fenómeno que no haría sino incrementar las diferencias y las desigualdades en la sociedad.[23]

Además de las consideraciones éticas, existen desafíos técnicos relacionados con la reproducibilidad y la seguridad. Por ejemplo, el sistema no siempre corta el ADN de manera precisa y puede causar mutaciones no deseadas. Es fundamental mejorar la precisión y la eficiencia de la tecnología para garantizar su seguridad y efectividad. Además, también se deben abordar preocupaciones sobre la capacidad de CRISPR para editar varias secuencias genéticas simultáneamente y los posibles efectos no deseados de estas ediciones.

Por último, quedan muchas preguntas por responder en el campo de las patentes –uno de los casos sobre propiedad intelectual más mediáticos de los últimos años[24]– y la regulación de la tecnología CRISPR-Cas9. Esta tecnología plantea desafíos regulatorios a distintos niveles y requiere de una legislación estricta y extremadamente clara sobre cómo y cuándo se puede utilizar.[25] Es necesario garantizar que CRISPR se utilice de manera ética y segura, para evitar un uso indebido o irresponsable. Jennifer Doudna, una de las pioneras de CRISPR, actualmente trabaja por difundir y debatir las implicaciones éticas y legales de las tecnologías de edición genética y, entre otras cosas, ha co-fundado un instituto de investigación que promueve "el bien común" para desarrollar soluciones contra enfermedades, el hambre y problemas sociales como la crisis climática.[26] En resumen, esta herramienta revolucionaria descubierta en la Costa Blanca tiene el potencial de transformar la medicina, la agricultura y la biotecnología, pero plantea una serie de desafíos éticos, sociales y tecnológicos que deben abordarse de manera rigurosa para minimizar los riesgos y proteger el bienestar de la sociedad.

Los sistemas más relevantes de CRISPR-Cas



Fuente: Cells

Principios de gobernanza de la edición genética en humanos

Fuente: Parlamento Europeo

ESTADO DE DERECHO, DERECHOS HUMANOS Y VALORES DEMOCRÁTICOS

Todas las formas e iniciativas relacionadas con la gobernanza (pública o privada) y a todos los niveles (nacional, UE, internacional) deben garantizar el respeto del estado de derecho, los derechos humanos y los valores democráticos.

DIGNIDAD HUMANA, AUTONOMÍA Y CAPACIDAD DE ACCIÓN

La regulación de las intervenciones en el cuerpo humano requiere la mejora de los mecanismos y prácticas disponibles para que los pacientes o usuarios ejerzan sus derechos al consentimiento informado, a participar en las decisiones sanitarias y a beneficiarse de los avances científicos. El seguimiento a largo plazo de los pacientes sometidos a edición genómica o la inclusión en registros públicos de edición genómica deben garantizar el respeto de la privacidad, la vida familiar y la protección de datos.

DEBATES INCLUSIVOS

La gobernanza de la edición genómica debe proporcionar foros para debates sociales inclusivos, justos y transversales con partes interesadas de múltiples niveles. En particular, se deben ofrecer oportunidades de participación significativa a las personas y grupos que representan a quienes tienen más probabilidades de verse afectados por la tecnología y su regulación: investigadores, profesionales sanitarios, pacientes y sus familias.

SALUD PÚBLICA Y SEGURIDAD INDIVIDUAL

En la evaluación de las preocupaciones en materia de seguridad y de las vías de aplicación clínica deben integrarse perspectivas y enfoques interdisciplinarios, y transdisciplinarios, incluidas consideraciones éticas y de ciencias sociales.

INTERFAZ ENTRE FORMAS PÚBLICAS Y PRIVADAS DE GOBERNANZA

Los mecanismos privados de gobernanza de la tecnología desempeñan un papel importante y deben fomentarse para:
a) la apertura, la transparencia, la fiabilidad y la rendición de cuentas;
b) la gestión justa y responsable;
c) la accesibilidad, la disponibilidad, la aceptación y la calidad de la atención sanitaria y de los servicios y productos relacionados con la salud.

PLURALISMO ÉTICO Y JURÍDICO

El desarrollo de principios comunes debe garantizar el respeto del pluralismo ético y jurídico entre las diferentes comunidades, regiones y países, en la medida en que se preserve el respeto de los derechos humanos y los principios fundamentales del Derecho de la UE.

COHERENCIA Y CONSISTENCIA DEL CONTENIDO NORMATIVO

Todas las intervenciones regulatorias deben garantizar un nivel mínimo de coherencia y consistencia del contenido normativo capaz de crear seguridad jurídica y facilitar el cumplimiento, independientemente de la necesidad de utilizar mecanismos regulatorios diversificados y enfoques para la regulación sectorial específica.

REGULACIÓN DINÁMICA Y RESILIENTE

Las intervenciones de gobernanza deben incluir mecanismos dinámicos para garantizar la resiliencia frente a los continuos avances técnicos y la evolución de los fenómenos relacionados con la tecnología social, garantizando que las iniciativas de gobernanza se guíen por principios éticos y se basen en el estado del arte científico.

ESTRUCTURAS DE GOBERNANZA ESPECIALIZADAS

Se deben establecer, apoyar y desarrollar estructuras de gobernanza públicas y privadas y organismos institucionales dedicados a la edición genómica (a nivel internacional, de la UE y/o nacional), incluidos los registros de edición genómica.

COOPERACIÓN TRANSNACIONAL

La cooperación y la coordinación de los esfuerzos regulatorios y la aplicación conexa a nivel internacional y entre los Estados miembros de la UE deben seguir siendo una prioridad.

Reconstruir la sanidad desde los genes

EN ACCIÓN

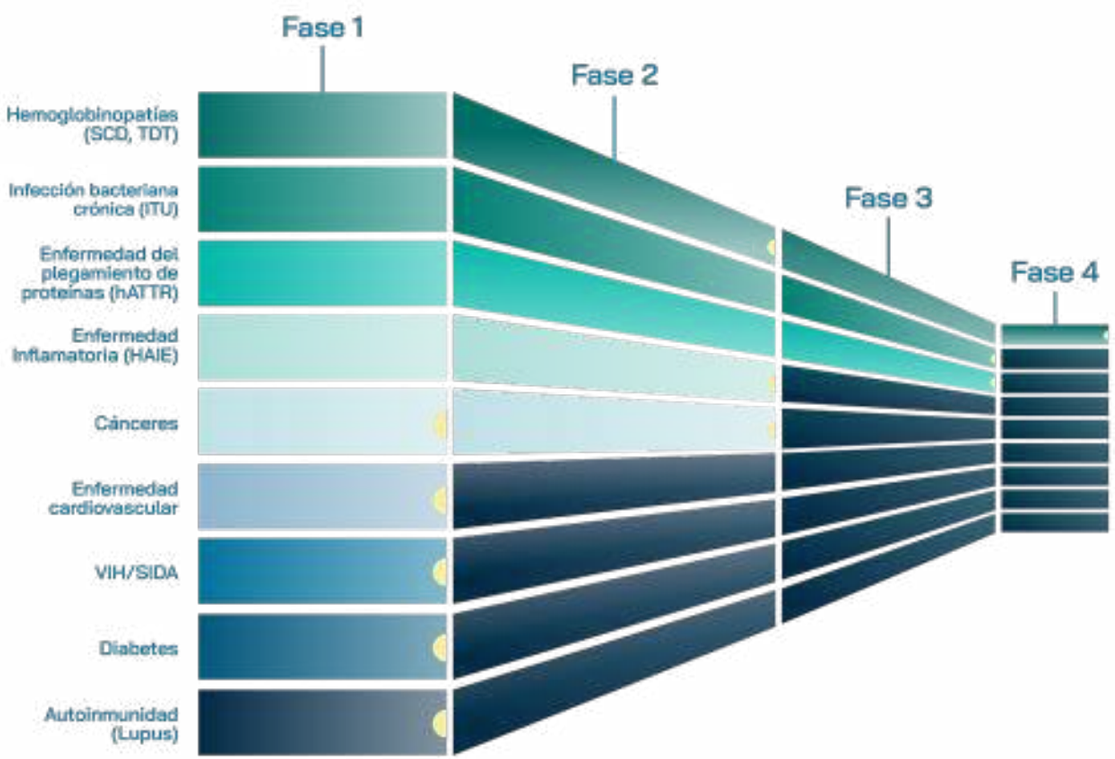
La Agencia Reguladora de Medicamentos y Productos Sanitarios del Reino Unido fue la primera autoridad en aprobar el Casgevy en noviembre de 2023. Se trata de la primera terapia CRISPR para anemia falciforme y beta talasemia dependiente de transfusión (TDT), desarrollada por la norteamericana CRISPR Therapeutics en alianza con la irlandesa Vertex. La Administración de Alimentos y Medicamentos de EEUU (FDA) siguió sus pasos, con una aprobación inicial para la anemia de células falciformes en diciembre de 2023 y para la TDT en enero de 2024. Finalmente, la Comisión Europea hizo suya la opinión positiva adoptada por la Agencia Europea de Medicamentos (EMA), en diciembre de 2023, aunque acabó concediendo una autorización de comercialización condicionada para un año, renovable anualmente a medida que se proporcionen más datos clínicos[27].

A pesar de la primera ola de aprobaciones de terapias celulares y genéticas, la industria aún está en su etapa inicial y las diferencias geográficas entre las autoridades regulatorias no contribuyen a clarificar el terreno de juego. El sector biotecnológico asociado al CRISPR aún tiene que ahormar las regulaciones a sus novedosas necesidades, y los Estados están optando por las posiciones más estrictas mientras no se resuelvan los interrogantes todavía abiertos. Se necesita fijar estándares de calidad que permitan poner en marcha estrategias que ayuden a escalar la tecnología. Mientras tanto, se suceden las circunstancias paradójicas en el entorno de salud: la primera terapia con células T con receptor de antígeno quimérico (CAR), *Kymriah* del gigante Novartis, se aprobó en 2017, y el coste de desarrollar una nueva terapia celular o genética ronda los 1.940 millones de dólares, teniendo en cuenta la tasa de abandono de la investigación y el desarrollo[28], pero desde la perspectiva de los responsables públicos vivimos en un mundo en el que un laboratorio modestamente financiado y con un equipo pequeño de técnicos capacitados puede usar CRISPR para alterar el genoma humano, un hecho a la vez estimulante y aterrador[29]. Europa ha advertido, por ejemplo, de que existe una necesidad urgente de definir y armonizar los criterios con base científica que deben determinar la gravedad de una enfermedad para que se justifique la edición genómica. Una actividad no controlada puede plantear grandes riesgos sociales y éticos, de modo que es partidaria de un marco regulatorio estricto. Al Parlamento Europeo no le basta, en ese sentido, la expresión "mejora humana" como criterio para este tipo de intervenciones, lo considera vago, cargado de valores y difícil de aplicar. Prefiere establecer los tipos de edición que deberían prohibirse o restringirse, y dotarse de un enfoque multinivel basado en el riesgo.

Dado que el mercado está fragmentado, las contribuciones al esfuerzo de coordinación regulatoria deben provenir no sólo de los gobiernos nacionales, sino también de las instituciones supranacionales. Esto al final se traduce en más incertidumbre para los inversores, una indeterminación que está condicionando el desarrollo de una industria que cuenta con un sustrato científico-tecnológico de primer nivel en los países occidentales. Los fondos de inversión con sede en Europa han crecido significativamente desde 2010 y están logrando tasas internas netas de rendimiento sobre inversiones en las últimas etapas del 15%, en comparación con el 13% en EEUU. Sin embargo, este país cuenta con 22 fondos para biotecnología de más de 1.000 millones de dólares, en comparación con sólo uno de este tamaño en Europa[30]. Las dudas regulatorias no facilitan tampoco el fomento de una cultura empresarial que asuma riesgos: el mercado europeo representó solo el 24% de las nuevas empresas de biotecnología del mundo entre 2018 y 2020, en comparación con el 65% de Estados Unidos. China ha pasado en ese tiempo del 8% al 12%.

Los datos de capital riesgo y startups producen un profundo contraste con el hecho de que las principales vacunas contra la COVID-19 fueron desarrolladas por científicos en Europa: la de Pfizer-BioNTech y la de AstraZeneca. Más incluso en el caso de España, donde el investigador Francis Mojica descubrió los principios teóricos del CRISPR, pero no se ha registrado ni una sola patente relacionada con su trabajo. No debe

CRISPR en ensayos clínicos 2024



Fuente: Instituto de Genómica Innovadora

extrañar que el 95% de las empresas biotecnológicas europeas que cotizan en EEUU lo haga en el Nasdaq. Se prevé que el mercado de terapias celulares y genéticas desarrolladas a partir de fuentes tanto alogénicas (el material celular proviene de diversos individuos de la misma especie) como autólogas (es del mismo individuo que recibe el tratamiento) alcance casi 160.000 millones de dólares en 2028. Los medicamentos autólogos liderarán el camino, contribuyendo con 83.000 millones de dólares, frente a los 74.000 millones de dólares de las terapias alogénicas[31]. La mayoría de las 3.951 terapias celulares y genéticas en desarrollo se encontraban en la fase preclínica a principios de 2024, y el siguiente grupo más grande era la de terapias en fase de descubrimiento. Una cuarta parte de ellas estaban diseñadas para tratar diferentes formas de cáncer, seguidas de enfermedades que afectan al sistema nervioso central y afecciones oftálmicas. En 2.111 casos eran terapias genéticas, incluidas las terapias celulares genéticamente modificadas, como las terapias de células T con CAR, mientras que las terapias celulares genéticamente modificadas ascendían a 878. El 97% de las terapias con células CAR-T en desarrollo estaban dirigidas a suprimir distintas variantes de cáncer y el resto incluían esclerodermia, VIH/SIDA y enfermedades autoinmune. De las 1.038 terapias genéticas en desarrollo para enfermedades raras, ocho de las 10 principales eran también oncológicas, encabezadas por mieloma, leucemia mielógena aguda, linfoma no Hodgkin, linfoma de células B y cáncer de ovario.

Pensando en los ciudadanos, la clave es que todas esas tareas pendientes de armonización estratégica no obstaculicen el acceso a opciones terapéuticas experimentales o recientemente aprobadas, incluida la participación en ensayos clínicos[32]. En ese sentido, es lógico admitir que la vía del ensayo clínico tradicional para un tratamiento que podría acabar administrándose a 10 pacientes al año, como sucede con las terapias genéticas, no puede ser la misma que la del tratamiento que se administrará a 100.000 o a millones, como sucede con los fármacos más populares. Para facilitar los tratamientos minoritarios, Europa ha instituido la Norma de Exención Hospitalaria[33], destinada a beneficiar a las personas con enfermedades ultrarraras. En España, la autorización de estos medicamentos de terapia avanzada de fabricación no industrial está regulada en un Real Decreto[34], según el cual los medicamentos reciben una autorización de uso en el marco de una institución hospitalaria y sólo para el tratamiento de un paciente individualizado.

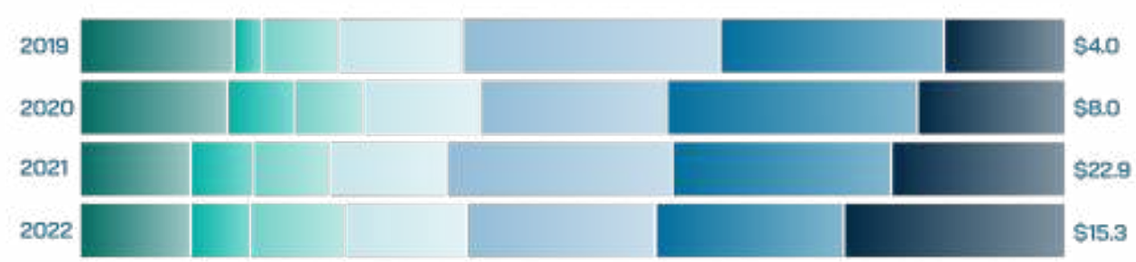
El problema es que el espectro de tecnologías no deja de complicarse: desde el CRISPR Cas9 inicial, que se configuraba como un sistema de edición simple, se ha pasado a un amplio abanico de editores, editores base y prime

editing, mucho más complejos. Junto a ello, hay que conciliar los productos personalizados con el desarrollo de procesos repetibles que arrojen resultados reproducibles, algo cada vez más crítico a ojos de los reguladores. Una de las claves consiste en facilitar que los innovadores trabajen con las autoridades lo antes posible en el análisis del ciclo de vida del producto con objeto de comprender sus requisitos de aprobación. EEUU se ha propuesto asimismo mejorar la armonización con otros reguladores en el ámbito de las terapias genéticas, especialmente en el caso de las enfermedades raras, que afectan a pocos individuos. Además, su estrategia contempla respaldar a las pequeñas empresas y, para ello, la FDA ha lanzado un piloto de programa de Apoyo a los Ensayos Clínicos que Avanzan en la Terapia de Enfermedades Raras (START), que utiliza métodos similares a los empleados en su día por el Proyecto Warp Speed, durante el desarrollo de la vacuna COVID-19, para apoyar el desarrollo de terapias genéticas[35].

El aumento previsto de la demanda plantea dudas también acerca de las posibles limitaciones en la capacidad actual y futura de fabricación de soluciones médicas basadas en CRISPR. La fabricación a escala de fármacos de terapia celular implicaría producir lotes de hasta 2.000 litros en formatos desechables de un solo uso, lo que limita las opciones de cualquier empresa de biotecnología. Si la terapia pudiera llegar a cientos o miles de pacientes, las empresas tendrían que generar entre 10^{11} y 10^{14} células al año, lo que supondría una gran carga para el área de operaciones[36]. Los procesos que permitan una administración más rápida de la terapia CAR T tendrán, por consiguiente, un valor esencial una vez que esta opción de tratamiento se convierta en el estándar de atención. En el ámbito de las vacunas, preocupa la bien documentada escasez de vectores virales, dado que se espera que el número de aprobaciones crezca en los próximos cinco años y hay relativamente pocos sitios de fabricación por contrato en todo el mundo. La misma necesidad de mayor eficiencia se aplica a la produc-

Inversión de capital riesgo en empresas de biotecnología por ramas de actividad

Financiación de capital de riesgo, miles de millones de dólares, %



Nota: Las cifras pueden no sumar el 100 %, debido al redondeo. El gráfico incluye acuerdos de más de 10 millones de dólares de la Serie A a la Serie I en empresas privadas durante 2019-22; filtrado por industrias de "biotecnología"; excluye las empresas de biotecnología no terapéuticas, como los servicios de investigación y de contratos, la biotecnología industrial y la alimentación y la agricultura.

Fuente: análisis de McKinsey basado en datos de PitchBook a los que se accedió en octubre de 2023

ción de vectores lentivirales para terapias celulares modificadas genéticamente, en las que se necesita un procesado posterior rápido y optimizado debido a problemas de estabilidad con el tiempo.

La cuestión del precio está abriendo un fuerte debate ético. Si bien las dosis únicas de la terapia CAR T cuestan unos cientos de miles de dólares, las terapias genéticas disponibles en el mercado valen millones. Vertex y CRISPR Therapeutics fijaron un precio de 2,2 millones de dólares para el tratamiento único de Casgevy, aunque a principios de 2024 no habían concretado cuál sería el que aplicarían en Europa, donde el acceso se determina a partir de las negociaciones con las autoridades nacionales. Vertex ha organizado un acceso temprano para los pacientes de TDT en Francia antes del reembolso nacional y tenía previsto abrir en Europa 25 centros de tratamiento autorizados, tres de los cuales estaban operativos en el momento del anuncio. El mismo día que la FDA aprobó Casgevy para la enfermedad de células falciformes, dio el visto bueno también a la terapia génica basada en células Lyfgenia de Bluebird Bio que se sumaba al que recibió también, en agosto de 2022, su terapia genética Zynteglo para tratar la TDT. Lyfgenia tenía un precio de 3,1 millones de dólares en 2024, mientras que el de Zynteglo era de 2,8 millones[37]. Por si fuera poco, además de las cuestiones de acceso y fijación de precios, existen consideraciones de riesgo. La quimioterapia requerida antes de administrar el tratamiento CRISPR puede ser dura para los pacientes y conlleva el riesgo de efectos secundarios graves.

Hay varias áreas en las que los fabricantes pueden centrarse para reducir el coste de las terapias. Los métodos tradicionales de fabricación implican procesos manuales realizados por trabajadores altamente calificados y experimentados en un ambiente de sala limpia. La transición de la fabricación a un entorno automatizado se presenta como un paso fundamental para aumentar la eficiencia. En el ámbito de la terapia celular, está surgiendo un enfoque innovador complementario para reducir costes, con empresas como Umoja Biopharma a la cabeza, que implica el uso de terapia génica para permitir que el propio cuerpo sea el que fabrique células diseñadas para el tratamiento, evitando el cuello de botella de fabricación tradicional y abriendo nuevas posibilidades para soluciones más efectivas y personalizadas.

Otro factor determinante para dar viabilidad a las nuevas terapias es el alto precio de las materias primas, en particular de los medios de cultivo celular especializados, ricos en factores de crecimiento y citoquinas. El desarrollo de una generación más eficiente de medios de cultivo celular, con un mayor uso de componentes recombinantes, podría contribuir a abaratar las terapias. Finalmente, las innovaciones dirigidas a crear productos bajo la fórmula de 'listos para usar' siguen planteando un enfoque crítico en este campo, y empresas como Be Biopharma y Neurona Therapeutics vienen trabajando activamente en tratamientos alogénicos que tienen el potencial de reducir costes.

A estos condicionantes se añadió en 2023 una llamativa pérdida de interés de los inversores, tras el estallido asociado a la pandemia del COVID-19. El capital riesgo quiere ver rentabilidad en el horizonte y eso empuja a las empresas biotecnológicas a dedicar su atención a los ensayos clínicos para lanzar nuevos productos al mercado lo más rápido posible. Debido al alto precio que tienen éstos, varias empresas centradas en CRISPR han reducido plantillas, en un entorno de despidos generalizado que ha implicado a más de 250 firmas del sector entre 2022 y 2023. Han decidido enfocarse en sus productos más desarrollados, en lugar de abordar nuevos tratamientos y expandirse hacia otras áreas de enfermedades. El S&P Biotechnology Select Industry Index cerró el cuarto trimestre de 2023 un 50% por debajo de su máximo de febrero de 2021[38]. Ese año sólo 30 empresas biotecnológicas habían realizado una IPO (Initial Public Offering) en los primeros tres trimestres de 2023 frente a las 114 de 2021[39], y el capital captado ascendió a solo 3.400 millones de dólares, frente a 16.000 millones de dos años antes. Un indicador de mayor propensión al conservadurismo podría ser que, en el cuarto trimestre de ese año, el número de terapias génicas en ensayos clínicos de fase III creció un 10%, lo que supuso el primer aumento trimestral de ese tipo desde el tercer trimestre de 2022[40].

A principios de 2024, sólo estaba previsto un ensayo en una sola área de enfermedad nueva para todo el año: la autoinmunidad[41]. Editas Medicine estaba realizando evaluaciones de fase 1/2 para personas con ECF grave

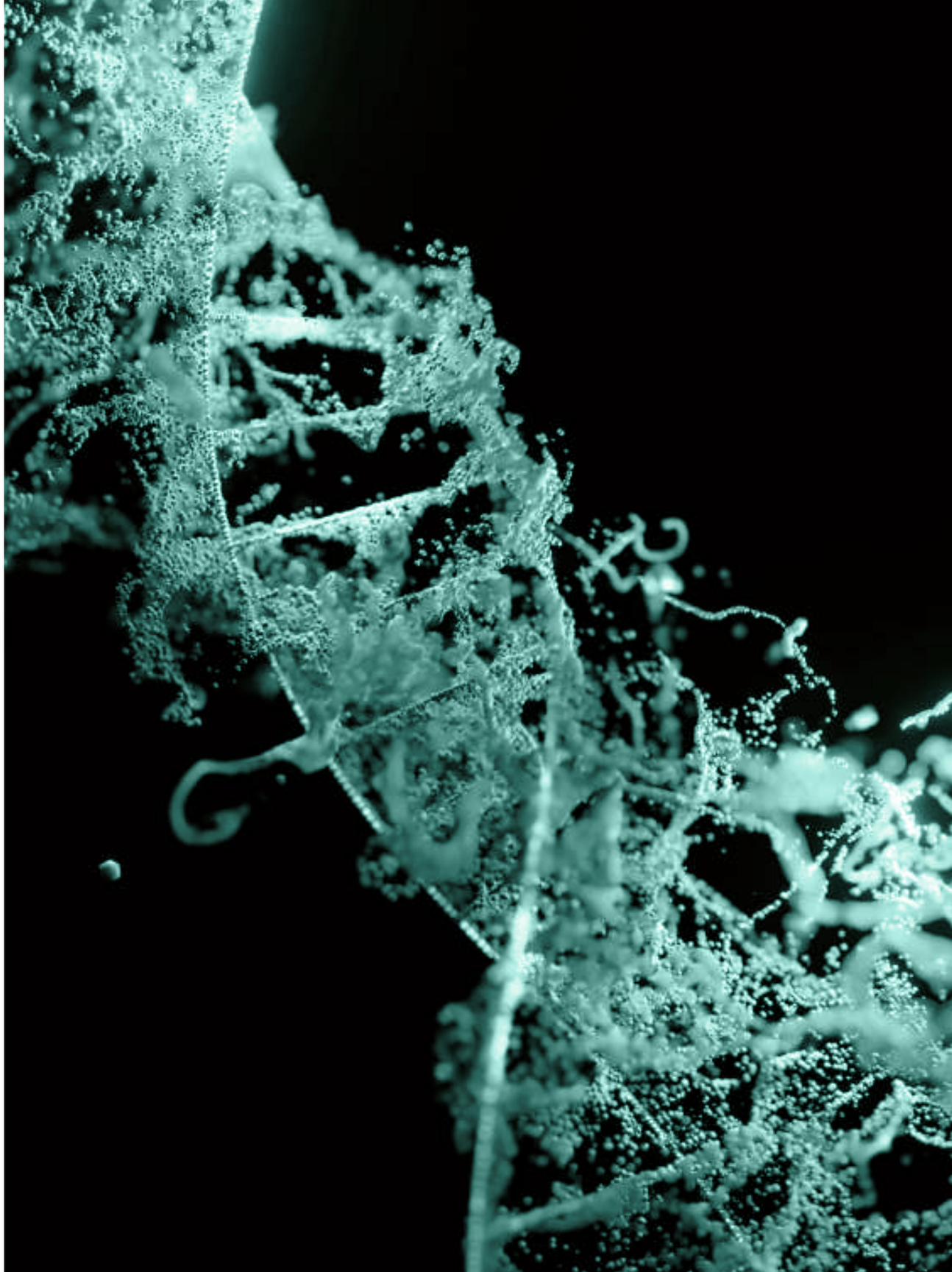
y TDT, utilizando un sistema CRISPR con la proteína Cas12a[42], en lugar de la más famosa Cas9, en lo que suponía el primer caso de utilización de la Cas12 en un ensayo clínico. También en enero de 2024, Beam Therapeutics anunció que había dosificado al primer participante en su ensayo de fase 1/2 en EEUU de una terapia de edición de bases para la ECF grave. La edición bases es una versión de la tecnología CRISPR-Cas9 que cambia una sola letra del ADN, sin crear roturas en la doble hebra del ADN, lo que reduce ciertos riesgos, por lo que ha despertado interés entre los inversores. Hasta ese momento, todas las terapias eran ex vivo: las células se extraían del cuerpo, se editaban y se controlaba su calidad en un laboratorio especial, hasta que eran devueltas al cuerpo después de que el paciente se sometiera a una quimioterapia intensiva. La terapia in vivo significaría administrar el medicamento de edición genética directamente en el cuerpo de la persona, donde se editan las células.

A pesar del duro contexto, empresas como Scribe Therapeutics, en ingeniería CRISPR por diseño, Sail Biomedicines, en programación de ARN, y ADARx Pharmaceuticals, en edición de ARN, subrayaban la voluntad de la industria de apostar por tecnologías novedosas incluso cuando enfoques existentes como CRISPR-Cas9, CAR-T y TCR aún están en desarrollo. Una tendencia destacada es la creciente colaboración con nuevas empresas emergentes de fabricación y desarrollo de contratos, como ElevateBio y Resilience, para aprovechar su experiencia en fabricación especializada[43]. Se investigan, asimismo, proteínas de fusión CRISPR y nuevas nucleasas por su capacidad para facilitar integraciones específicas en grandes secuencias genéticas, de modo que, en lugar de reparar mutaciones individuales, se puedan reemplazar completamente secuencias genómicas defectuosas más grandes con versiones corregidas, expandiendo potencialmente el impacto de la edición genética a más enfermedades.

La estrategia de la FDA norteamericana pasa por agilizar la aprobación de tecnologías de plataforma. La Ley Ómnibus de Asignaciones de 2023 contiene disposiciones para facilitar la aprobación de nuevas terapias genéticas en ese sentido. Una tecnología de plataforma se aplica cuando todas las partes de un tratamiento se estandarizan en un único paquete disponible en el mercado y solo ciertas partes cambian para una enfermedad determinada. Para los tratamientos basados en CRISPR, la parte estandarizada incluiría a la proteína Cas, el método de entrega a las células, la administración del tratamiento y la dosis que recibe el paciente. Lo único que cambiaría sería la secuencia del ARN guía y la plantilla de reparación de ADN que deba especificarse para diferentes ediciones. A principios de 2024, CRISPR Therapeutics se declaraba bien posicio-

nada para ejecutar ensayos clínicos en áreas como oncología, autoinmunidad, cardiovascular y diabetes, con la perspectiva de obtener resultados durante los siguientes 12 a 18 meses, abierta a innovar en su plataforma de tecnologías de entrega y edición de genes de próxima generación, incluso en el entorno macroeconómico desafiante para las empresas de biotecnología[44].

En última instancia, la tecnología estará asociada siempre a la batalla de las patentes. Desde que, en abril de 2014, la USPTO (United States Patent and Trademark Office) otorgó la patente estadounidense n.° 8.697.359[45] al Broad Institute, el MIT y el científico Feng Zhang, los componentes y métodos CRISPR recogidos en ella se han convertido en el estándar líder para la edición del genoma en todo el mundo. Los propietarios de la patente han compartido abiertamente reactivos y herramientas CRISPR con más de 3.000 instituciones en 75 países a través de la organización sin fines de lucro Addgene[46]. Para la investigación de empresas, Broad Institute otorga licencias de CRISPR IP a través de un modelo abierto de "innovación inclusiva" que permite maximizar las oportunidades de desarrollo terapéutico en enfermedades humanas. Las patentes emitidas por Broad son para la edición del genoma y su uso en células eucariotas, incluidas células de animales, humanos y plantas. El instituto insiste en diferenciarlas, en consecuencia, de las que emite la Universidad de California-Berkeley (UCB), que no son específicas para usos en células eucariotas, y en pedir a ésta que se una a las discusiones sobre un grupo de patentes[47] u otro enfoque de concesión de licencias coordinadas, como el que desarrolló para CRISPR en la agricultura. En Europa, al Broad Institute se le han concedido 33 patentes CRISPR, incluidas 29 patentes relacionadas con CRISPR-Cas9 y cuatro relacionadas con CRISPR-Cas12/Cpf1, pero tanto éstas como las aprobadas para la UCB han encontrado la oposición de múltiples partes, por lo general por cuestiones técnicas de la solicitud.



Ciencia básica pendiente de transferencia

ESPAÑA

Eventos internacionales como The CRISPR MEDiCINE Conference[48] de Copenhague (Dinamarca) ponen de manifiesto el potencial de la ciencia básica española en el desarrollo de técnicas asociadas a la salud. Está muy por encima del nivel de desarrollo alcanzado por la industria hasta el momento para escalar estas soluciones.

Para la corrección aguda de una amplia gama de mutaciones asociadas a enfermedades se viene apostando por la edición genética. Pero en determinados casos, como la anemia de Fanconi (FA), el mecanismo de reparación del ADN dirigida por homólogos, el más convencional, no funciona y se requieren enfoques de terapia génica alternativos. CIEMAT/CIBERER de Madrid ha optimizado el uso de la edición de bases y la edición principal para corregir potencialmente la mayoría de las mutaciones descritas en pacientes, con el objetivo final de generar fármacos más personalizados. Asimismo, junto al Fundación Instituto de Investigación Sanitaria de la Fundación Jiménez Díaz, la Universidad Carlos III, IMDEA Nanociencia y el Hospital Ramón y Cajal, están investigando también en mecanismos para evitar los efectos de la queratodermia palmoplantar debilitante, asociada a ampollas angustiosas que limitan gravemente la capacidad para caminar, que suelen desarrollar los pacientes de paquioniquia congénita, un trastorno cutáneo hereditario poco común. Las herramientas CRISPR abren posibilidades para protocolos de terapia génica con los que hacer frente a esta dolencia.

Por otra parte, se ha demostrado que el uso de nickasas Cas9 emparejadas para la alteración genética in vivo proporciona una vía potencial para disminuir las frecuencias de inserción de virus adenoasociados. Sin embargo, esta técnica requiere más investigación para comprender los factores que influyen en la elección de las vías de reparación de rotura de doble hebra escalonada. Investigadores de la Universidad de Navarra y la Harvard Medical School, están profundizando en esa línea.

Centros españoles de Universitat de Barcelona, CIBERER, Instituto de Salud Carlos III (ISCIII), IBUB e IRSJD, trabajan junto a la Universidad de Lund (Suecia) en los trastornos del neurodesarrollo causados por diferentes perturbaciones durante el desarrollo temprano del cerebro. Muchos de ellos tienen un origen genético, pero la mayoría de las alteraciones genéticas subyacentes siguen siendo desconocidas. El desafío consistía en avanzar en el conocimiento de ese proceso dado el acceso limitado a los tejidos cerebrales humanos en los primeros momentos del desarrollo y a la dificultad de utilizar modelos animales. El proyecto ha utilizado modelos in vitro de vanguardia acoplados a técnicas de secuenciación y edición de genes de última generación para estudiar los efectos que tienen una serie de mutaciones. Entre otras acciones, se generaron líneas de células madre pluripotentes inducidas, editadas con CRISPR, que incorporaban dos de las mutaciones estudiadas y ello ha permitido alcanzar hallazgos de importancia crítica. Los mismos actores españoles han trabajado en otro un enfoque prometedor para aliviar el dolor basado en la inactivación de dos enzimas que modulan los niveles de endocannabinoides, sentando las bases para explorar el potencial terapéutico de la edición de genes con ese objetivo en el sistema nervioso periférico.

La conexión internacional de nuestro ecosistema de investigación ha permitido también a CIEMAT y UC3M, además del Hospital Universitario "12 de Octubre" de Madrid, trabajar con el University College Dublin y la Universidad de Ciencia y Tecnología de Anhui (Huainan, China) en una plataforma para el cáncer pulmonar que utiliza biomateriales sintéticos para la administración de reactivos CRISPR/Cas9 a células epiteliales de pulmón adultas. Ha demostrado ser un enfoque eficiente para modelar la tumorigénesis pulmonar al inactivar simultáneamente un conjunto de genes supresores de tumores.

En el ámbito de la transferencia de estos avances al mundo emprendedor, destacan compañías biotecnológicas como Integra Therapeutics, que está creando herramientas de escritura genética de próxima generación. Se basa en la tecnología FiCAT, obtenida a partir de la investigación del laboratorio del Dr. Marc Güell en la Universidad Pompeu Fabra y orientada a resolver las limitaciones actuales en la escritura genética: tamaño, precisión y estabilidad. A mediados de 2024, se anunció la concesión de una subvención de 2,5 millones de euros y una inversión de capital de hasta ocho millones de euros de la Comisión Europea en la compañía a través del programa Accelerator del Consejo Europeo de Innovación (EIC). Integra Therapeutics destinará los 2,5 millones de euros iniciales a las actividades de precomercialización de su plataforma FiCAT para la ingeniería de células T y células madre hematopoyéticas (HSC), para desarrollar terapias celulares en enfermedades raras, enfermedades autoinmunes y oncología.

Relación de notas

[1] The Nobel Prize (2020). "**Genetic scissors: a tool for rewriting the code of life**". Publicado el 07/10/2020, consultado el 24/04/2024.

[2] Sergio Ferrer: "**El español olvidado que vislumbró la técnica genética más importante del siglo**". Teknautas (El Confidencial). Publicado el 16/01/2016, consultado el 24/04/2024.

[3] FJM Mojica, G Juez, F Rodriguez-Valera. **Molecular Microbiology**, 1993, 9, 3, 613. DOI: 10.1111/j.1365-2958.1993.tb01721.x

[4] ES Lander. "**The heroes of CRISPR**". Cell, 2016, 164, 1, 18, DOI: 10.1016/j.cell.2015.12.041

[5] **R Barrangou et al. Science**, 2007, 315, 5819, 1709, DOI: 10.1126/science.1138140

[6] **M Jinek et al. Science**, 2012, 337, 6096, 816, DOI: 10.1126/science.1225829

[7] C Sheridan. **Nature Biotechnology**, 2024, 42, 3, DOI: 10.1038/d41587-023-00016-6

[8] **F Ann Ran et al. Nature Protocols**, 2013, 8, 2281, DOI: 10.1038/nprot.2013.143

[9] M Murgia. "**How Scientists in Britain Are Deciding the Future of Humanity**". Newsweek. Publicado el 28/12/2016, consultado el 24/04/2024.

[10] J Watwani. "**DNA at play**". Down to Earth. Publicado el 31/03/2016, consultado el 24/04/2024.

[11] Rubén Megía González. "**CRISPR: ¿Qué es y cómo funciona?**" Genotipia. Publicado el 7 de junio de 2023, consultado el 24/04/2024.

[12] Niko McCarty. "**CRISPR — How It Works, Top Applications and How to Use It Yourself.**" Medium. Publicado el 26/04/2018, consultado el 24/04/2024.

[13] Brad Plumer et al. "**A simple guide to CRISPR, one of the biggest science stories of the decade**". Vox.com. Publicado el 27/12/2018, consultado el 24/04/2024.

[14] **R Barrangou, J Doudna. Nature Biotechnology**, 2016, 34, 933, DOI: 10.1038/nbt.3659

[15] Adele Peters. "**CRISPR Is Going To Revolutionize Our Food System—And Start A New War Over GMOs**". Fast Company. Publicado el 15/03/2016, consultado el 24/04/2024.

[16] Sara Reardon. "**FDA Approves First CRISPR Gene Editing Treatment for Sickle Cell Disease**". Scientific American. Publicado el 08/12/2024, consultado el 24/04/2024.

[17] Sharon Begly. "**Potential DNA Damage from CRISPR "Seriously Underestimated," Study Finds**". Scientific American. Publicado el 16/07/2018, consultado el 24/04/2024.

[18] Sharon Begley. "**Scientists unveil the 'most clever CRISPR gadget' so far**". STAT News. Publicado el 20/04/2016, consultado el 24/04/2024.

[19] Dylan Matthews. "A **genetically modified organism could end malaria and save millions of lives — if we decide to use it**". Vox.com. Publicado el 26/09/2018, consultado el 24/04/2024.

[20] El Periódico (2022). "**La edición genética permite a las células afinar su ataque contra el cáncer**". Publicado el 10/11/2022, consultado el 24/04/2024.

[21] NIH (2017). "What are the Ethical Concerns of Genome Editing?" Consultado el 24/04/2024.

[22] Institut Pasteur (2020). "**Human evolutionary genetics: the benefits of genetic diversity**". Publicado el 22/01/2022, consultado el 24/04/2024.

[23] "**How genetic engineering will reshape humanity**". The Economist. Publicado el 25/04/2019, consultado el 24/04/2024.

[24] Catherine Jewell and Vijay Shankar Balakrishnan. "**The battle to own the CRISPR–Cas9 gene-editing tool**". WIPO Magazine. Publicado en 01/04/2027, consultado el 24/04/2024.

[25] Z Nxumalo et al. "**Patents, ethics, biosafety and regulation using CRISPR technology**". Progress in Molecular Biology and Translational Science, 2021, 181, 345, DOI: 10.1016/bs.pmbts.2021.01.023

[26] Hannah Kuchler. "**Jennifer Doudna, Crispr scientist, on the ethics of editing humans**". Financial Times. Publicado el 31 de enero de 2020, consultado el 24/04/2024.

[27] **https://ec.europa.eu/health/documents/community-register/html/h1787.htm**

[28] Sabatini, M.T., Chalmers, M. **The Cost of Biotech Innovation: Exploring Research and Development Costs of Cell and Gene Therapies.** Pharm Med, 2023. doi.org/10.1007/s40290-023-00480-0

[29] Kevin Curran, **How on earth are we regulating human genetic modification?**, Rising Tide Biology, 24 de febrero de 2024

[30] Matthias Evers et al., "**Europe's Bio Revolution: Biological innovations for complex problems**", McKinsey, 10 de enero de 2023

[31] "**Cell and gene therapies: Pipe dream to pipeline**", Cytiva, 2023, consultado el 18/04/2024

[32] **Genome editing in humans**, Parlamento Europeo, junio de 2022

[33] **Exención hospitalaria**, Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios, 8 de noviembre de 2023, consultado el 01/05/2024

[34] **https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-6277**

[35] Jonah Comstock, "**JPM: Four ways FDA is seeking to buoy gene therapy**", Pharmaphorum, 9 de enero de 2024

[36] Pigeau GM, Csaszar E, Dulgar-Tulloch A, **Commercial Scale Manufacturing of Allogeneic Cell Therapy**, Front. Med., 2018, doi: 10.3389/fmed.2018.00233

[37] Robert Barrie, "**CRISPR gene therapy Casgevy secures approval in Europe**", Pharmaceutical Technology, 13 de febrero de 2024

[38] Emily Capra et al. "**What early-stage investing reveals about biotech innovation**", McKinsey, 12 de diciembre de 2023, consultado el 01/05/2024

[39] **S&P Capital IQ**

[40] "**Gene, Cell, + RNA Therapy Landscape Report, Q4 2023 Quarterly Data Report**", American Society of Gene & Cell Therapy / Citeline

[41] Hope Henderson, "**Ensayos clínicos CRISPR: una actualización en 2024**", Instituto de Genómica Innovadora, Universidad de California Berkeley, 13 de marzo de 2024, consultado el 01/05/2024

[42] **https://innovativegenomics.org/es/glosario/cas12/**

[43] Rebecca Springer, Kazi Helal, Aaron DeGagne, "**Takeaways From the 2024 J.P. Morgan Healthcare Conference**", PitchBook Data, 12 de enero de 2024

[44] **CRISPR Therapeutics Highlights Strategic Priorities and 2024 Outlook**, CRISPR Therapeutics, Press Release, 8 de enero de 2024

[45] **https://www.broadinstitute.org/files/shared/osap/pdf/US8697359.pdf**

[46] "**Declaraciones y antecedentes sobre el proceso de patente CRISPR**", Broad Institute, 28 de febrero de 2022

[47] Maria Nemchuk, "**Broad Institute of MIT and Harvard joins discussions to create worldwide CRISPR-Cas9 licensing pool**", Broad Institute, 10 de julio de 2017.

[48] **https://crisprmedicinenews.com/crisprmed/crisprmed24/**

05

Hacia una aviación sostenible

Hacia una aviación sostenible

2023 ha sido uno de los años más calurosos desde que tenemos registros de temperatura. Además, algunos estudios recientes sugieren que el planeta absorbe el CO_2 de forma cada vez más lenta, algo que podría acelerar las consecuencias de la crisis climática.[1] Y la industria de la aviación es uno de los factores más importantes en cuanto a emisiones de carbono, dado que representa entre el 2 y el 3% del total.[2] Por tanto, es el momento para rediseñar la industria aeronáutica desde el punto de vista de la sostenibilidad. Este capítulo analiza algunos de los principales retos del sector, así como las últimas soluciones e innovaciones tecnológicas para reducir el impacto global de los aviones. La asociación internacional del transporte aéreo (IATA) proyecta que el tráfico de pasajeros se duplicará antes de 2040 y calcula un crecimiento de los vuelos globales, incluyendo el transporte de carga, del 5% anual.[3] Urge implementar soluciones sostenibles y medidas efectivas de mitigación de las emisiones.

Eliminar el impacto ambiental de la aviación

POR DENTRO

En 2019, antes de la pandemia de COVID-19, la aviación comercial transportaba a más de 4.500 millones de pasajeros y movía alrededor de 61 millones de toneladas de carga. Este volumen de tráfico aéreo, impulsado por la globalización y el aumento de la movilidad, ha llevado a un crecimiento anual promedio del 5% en la demanda de vuelos. La aviación comercial y de carga es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero. Aunque un 2-3% de las emisiones globales de dióxido de carbono pueda sonar como un porcentaje pequeño, la contribución de la aviación al cambio climático es mayor debido a los efectos combinados de otras emisiones, como los óxidos de nitrógeno (NOx), y fenómenos atmosféricos asociados con los aviones, como las estelas de condensación y las nubes "artificiales" inducidas por el tráfico aéreo.[4] Los motores de los aviones emiten NOx, unos gases que, además de ser muy contaminantes, contribuyen a cambios en la concentración de metano y ozono troposférico, ambos potentes gases de efecto invernadero. A menor altitud, las emisiones de NOx también provocan la degradación de la calidad del aire, algo que afecta directamente a la salud humana y a los ecosistemas naturales.[5]

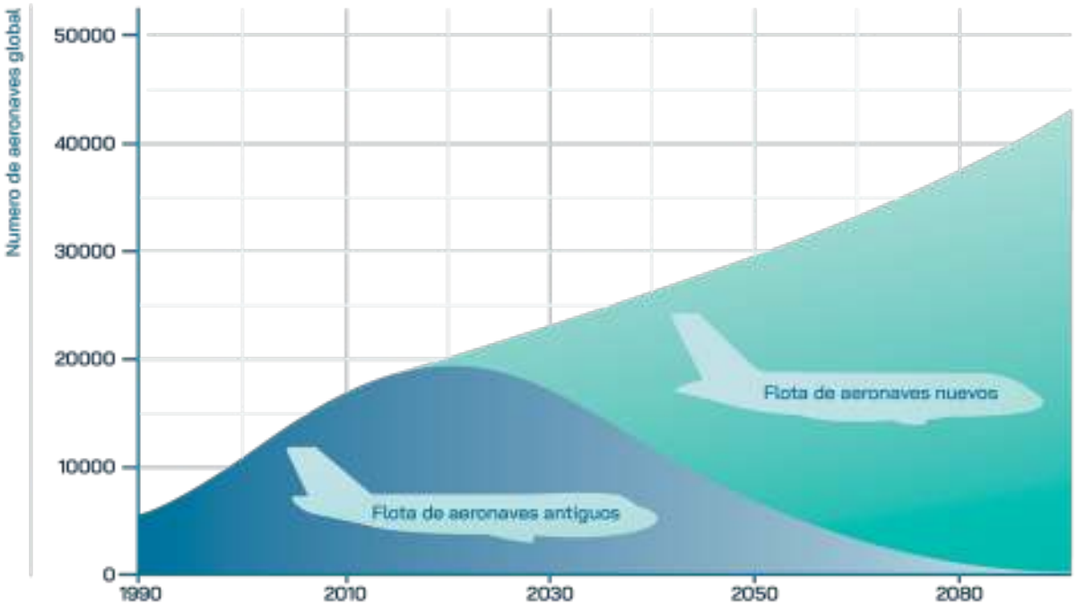
También entran en juego las estelas de condensación (que, técnicamente, se llaman *contrails*, no *chemtrails* como sugieren muchas teorías de la conspiración), una especie de "nubes artificiales" que se forman cuando el vapor de agua de los gases de escape de los motores se condensa en pequeñas partículas de aerosol en la atmósfera, creando líneas de nubes delgadas. Estas estelas pueden volverse persistentes y evolucionar en nubes cirrus, que tienen un efecto de calentamiento neto debido a su capacidad para reflejar y atrapar la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre. En resumen, los contaminantes emitidos por la aviación, como el CO_2, los NOx, el vapor de agua y las partículas de aerosol, contribuyen al calentamiento global. La creciente demanda de vuelos se traduce en un crecimiento indirecto de las emisiones debido a la necesidad de extraer más combustible, la expansión de la infraestructura aeroportuaria y la congestión del espacio aéreo. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) estima que el impacto total de la aviación en el cambio climático es aproximadamente el doble del causado por sus emisiones directas de dióxido de carbono, debido a estos efectos combinados.[6]

Durante la pandemia, las emisiones de CO_2 de la aviación disminuyeron significativamente debido a la reducción de vuelos y restricciones de viaje, lo que proporcionó una oportunidad única para evaluar su impacto ambiental y reflexionar sobre las estrategias para una recuperación sostenible. Por ejemplo, las estrategias de recuperación post-pandemia pueden servir como un catalizador para la inversión en tecnologías de aviación más limpias y eficientes. Por un lado, las aerolíneas y los fabricantes de aviones pueden acelerar la adopción de tecnologías de propulsión alternativa y combustibles sostenibles y, por otro, los gobiernos y las organizaciones internacionales pueden implementar políticas que promuevan la sostenibilidad en la aviación, como incentivos para el uso de combustibles sostenibles, regulaciones más estrictas sobre emisiones y apoyo financiero para investigación y desarrollo. Este capítulo revisa algunas de las propuestas más interesantes.

Antes de plantearse las posibles soluciones para descarbonizar la industria de la aviación, es razonable examinar algunos de los retos más importantes. Quizás uno de los principales problemas sea la altísima dependencia del queroseno como combustible. Esta sustancia líquida, algo más viscosa que la gasolina, tiene una altísima densidad energética: libera mucha energía al quemarse, en proporción al volumen que ocupa, y eso es ideal para el transporte aéreo, especialmente en distancias grandes. Sin embargo, quemar queroseno produce CO_2 y, además, es un combustible fósil y, por tanto, finito. Necesitamos soluciones alternativas que no solo sean limpias y menos contaminantes sino que, además, sean sostenibles y renovables.

Otro de los problemas de la industria aeronáutica es la complejidad de sus infraestructuras, no solo por las grandes inversiones que requiere para el desarrollo e implementación de nuevas soluciones, sino también por las barreras que imponen las regulaciones y normativas. Por motivos de seguridad, incluso el más mínimo cambio en una aeronave puede tardar

Evolución prevista de los modelos de aeronave



Fuente: Roberto Sabatini, Wiley

años, incluso décadas, en llegar a una aplicación comercial. Por tanto, es fundamental empezar los nuevos desarrollos tecnológicos cuanto antes para poder adoptar los cambios de forma eficaz. La modernización (y descarbonización) pasa por aprobar nuevos modelos regulatorios que faciliten y aceleren la toma de decisiones relacionadas con soluciones sostenibles.[7]

Una de las más accesibles, en ese sentido, consiste en el desarrollo de nuevos combustibles, más sostenibles que el queroseno. Aunque revisamos muchas de estas alternativas en el capítulo correspondiente a combustibles limpios, cabe destacar algunas de las innovaciones más interesantes en este sector, conocido popularmente como SAF, por las siglas en inglés de "combustibles sostenibles para aviación".[8] Algunas de las estimaciones más optimistas calculan que los SAF podrían reducir las emisiones de dióxido de carbono hasta un 95%.[9] Sin embargo, es importante considerar el origen de estos combustibles. Algunas alternativas como los biocombustibles (derivados de materias primas como azúcar, aceites vegetales, grasas animales y residuos agrícolas) plantean desafíos relacionados con la sostenibilidad a largo plazo y la competencia con la producción de alimentos. Una opción que quizás sea más interesante son los combustibles totalmente sintéticos, producidos imitando a las plantas a partir del CO_2 atmosférico y energías renovables, una solución que suele conocerse como fotosíntesis artificial o "power-to-liquid".[10] Los principales desafíos, en este caso, son tecnológicos. Aunque esta tecnología está lista para funcionar a escalas de laboratorio, todavía es demasiado pronto para producir combustibles en las cantidades que necesita y utiliza regularmente la industria aeronáutica. También tendríamos que mejorar la capacidad actual para la captura de carbono, de forma que podamos aprovechar el exceso de CO_2 en la atmósfera como una materia prima renovable y circular. En este sentido, existen numerosas iniciativas muy ambiciosas, entre las que destaca la planta industrial "Mamooth" diseñada y fabricada por Climeworks en Islandia, diez veces más grande que su antigua planta "Orca".[11] Esta planta proyecta capturar 36.000 toneladas de CO_2 – el equivalente a las emisiones anuales de 2.500 personas. Es un comienzo muy prometedor y muy positivo.[12]

Entre las distintas soluciones tecnológicas para descarbonizar la aviación, los motores eléctricos e híbridos representan un avance significativo, como en la industria automovilística. Estos sistemas de propulsión podrían conseguir vuelos con menos emisiones y, en el caso de los motores eléctricos, cabe la posibilidad de imaginar vuelos completamente libres de emisiones directas (siempre y cuando la electricidad provenga de fuentes renovables).[13] Los motores eléctricos, por un lado, funcionan mediante la conversión de la energía eléctrica, generalmente almacenada en baterías,

EMMA FERNÁNDEZ

En un país como España, donde el turismo representa un porcentaje relevante de nuestra economía, la innovación en aviación sostenible es crucial para reducir el impacto ambiental de un número creciente de visitantes que llegan a nuestro país en avión, así como una oportunidad para la industria aeronáutica española. El estado del arte en aviación sostenible se centra en el desarrollo de combustibles de aviación sostenibles (SAF), como los biocombustibles y los combustibles sintéticos, que pueden reducir significativamente las emisiones de carbono. Además, se están explorando tecnologías de propulsión eléctrica e híbrida, así como diseños aerodinámicos avanzados que mejoran la eficiencia del vuelo.

en energía mecánica. Esta tecnología resulta especialmente atractiva para vuelos de corta distancia y aviones pequeños. Los motores eléctricos tienen la ventaja de ser más eficientes y menos ruidosos que los de combustión interna. Además, suelen requerir menos mantenimiento, porque tienen una menor cantidad de piezas móviles. Sin embargo, su implementación (y su éxito) está supeditada a la densidad energética de las baterías actuales. Las baterías de ión-litio, las más utilizadas, no pueden almacenar suficiente energía para vuelos de larga distancia sin añadir un peso considerable. Por ejemplo, algunos prototipos en aviones pequeños (para 20 pasajeros) para viajes cortos, de hasta 400 kilómetros, pesan 3,5 toneladas, algo inasumible para aeronaves más grandes.[14] Las baterías también plantean muchos retos en torno a la seguridad: actualmente muchas baterías de ión-litio están prohibidas en las bodegas de los aviones por el riesgo de cortocircuitos e incendios espontáneos. A pesar de estos desafíos, la investigación en baterías de alta densidad energética, como las baterías de estado sólido, podría ofrecer soluciones milagrosas en el futuro.[15]

Por otro lado, los sistemas de propulsión híbrida combinan motores de combustión interna con motores eléctricos, proporcionando una mayor flexibilidad y eficiencia. Estos sistemas pueden funcionar en modo eléctrico puro durante el despegue y el aterrizaje, donde el consumo de combustible es mayor y las emisiones son más críticas (y, además, la potencia del motor eléctrico puede facilitar las maniobras), y en modo de combustión interna durante el crucero, donde la eficiencia del combustible es más alta. Esta combinación permite reducir tanto las emisiones como el consumo. Además, los motores híbridos, como en los coches, pueden recuperar parte de la energía generada durante el descenso y el frenado, que puede ser almacenada en baterías. Sin embargo, la integración de sistemas eléctricos e híbridos es compleja y requiere diseños y desarrollos muy diferentes a los aviones actuales, algo que podría ralentizar la adopción por parte de los grandes fabricantes. Algunas empresas, como Rolls Royce, han presentado resultados muy prometedores: están estudiando sistemas piloto en aeronaves pequeñas como helicópteros, con resultados interesantes y potencialmente escalables.[16]

El hidrógeno es otra tecnología emergente con un potencial significativo para descarbonizar la aviación. Como combustible, el hidrógeno tiene menor densidad energética (en volumen) que los combustibles fósiles, pero es algo más versátil: puede usarse tanto como fuente de energía en pilas de combustible, para generar electricidad, o directamente como combustible en motores de combustión modificados. Las pilas de combustible, por ejemplo, ofrecen una capacidad muy superior a las baterías, y podrían permitir vuelos de mayor alcance con cero emisiones. Por otro lado, el hidrógeno también puede ser quemado directamente en motores de combustión, para aprovechar la infraestructura existente de motores y aeropuertos, con ciertas adaptaciones. Sin embargo, la adopción del hidrógeno enfrenta desafíos técnicos y económicos, como repasamos en el informe INTEC de 2021,[17] entre ellos los problemas relacionados con el almacenamiento seguro y la infraestructura necesaria para su distribución, que presenta requisitos muy distintos a los combustibles tradicionales.[18] A pesar de esto, el hidrógeno supone una oportunidad clave para la aviación de largo alcance sin emisiones, y varios proyectos y prototipos, tanto públicos como privados, están actualmente en desarrollo. Por ejemplo, la empresa alemana H2Fly llevó a cabo una demostración del primer vuelo con hidrógeno líquido en 2023,[19] y otras empresas en EEUU siguieron su estela con varios ensayos muy exitosos.[20]

Además de las innovaciones en sistemas de propulsión, el desarrollo de nuevos materiales y el diseño avanzado de aeronaves pueden desempeñar un papel crucial en la reducción de las emisiones de la aviación hacia una solución de transporte más sostenible. En primer lugar, los nuevos materiales y los materiales compuestos (también conocidos comúnmente como "composites") están revolucionando la industria aeronáutica. Estos materiales, como la fibra de carbono y el grafeno, son significativamente más ligeros, pero más fuertes y resistentes que los materiales tradicionales como el aluminio.[21] La reducción de peso es una de las formas más fáciles de mejorar la eficiencia en las aeronaves. Un peso menor reduce la cantidad de energía (y, por lo tanto, de combustible) necesaria para el despegue, el ascenso y el tramo de navegación a velocidad de crucero. Además, los nuevos materiales compuestos pueden ofrecer una mayor resistencia a la corrosión y fatiga, lo que prolonga la vida útil de las aeronaves y reduce los costes de mantenimiento.[22]

El uso de nuevos materiales compuestos también presenta desafíos, sobre todo relacionados con la inversión en investigación y, más adelante, con

los estudios de viabilidad y seguridad que requiere la regulación actual. A pesar de estos desafíos, el uso de materiales compuestos está aumentando, y varios modelos de aeronaves modernas como el Boeing 787 y el Airbus A350 ya incorporan una alta proporción en su estructura.[23] Por otro lado, además, la ingeniería aeroespacial trabaja por desarrollar diseños nuevos, más aerodinámicos, que buscan reducir la resistencia al avance, lo que a su vez disminuye el consumo de combustible. Los avances en simulación por ordenador y en los túneles de viento han permitido a los ingenieros diseñar aeronaves con perfiles mucho más eficientes. Las alas más delgadas y de mayor envergadura, combinadas con tecnologías como los *winglets*, que reducen el arrastre inducido, son ejemplos muy recientes de estas mejoras. Además, los fuselajes con formas más aerodinámicas y las superficies de control optimizadas no solo reducen el consumo de combustible, sino que también pueden aumentar la velocidad de crucero y mejorar la capacidad de carga de las aeronaves.

Algunas de las aerolíneas más grandes del mundo han presentado importantes iniciativas para reducir sus emisiones y están invirtiendo de forma muy activa en diferentes tecnologías sostenibles. Por ejemplo, Air France y KLM han lanzado varios programas de sostenibilidad, que incluyen entre otras cosas la modernización de su flota con aviones más eficientes en consumo de combustible y la implementación de prácticas operativas más ecológicas, como la compra y uso de combustibles SAF.[24] British Airways también se ha comprometido a alcanzar un objetivo "cero emisiones" antes de 2050, invirtiendo en nuevos aviones de bajo consumo, optimizando sus rutas de vuelo y explorando, como Air France y KLM, el uso de SAF.[25] Al otro lado del Atlántico, Delta Air Lines ha anunciado inversiones significativas en tecnologías de reducción de carbono y proyectos de compensación de las emisiones, así como nuevos programas de investigación y desarrollo de aviones eléctricos e híbridos.[26] Más allá de las aerolíneas, varios proyectos pioneros están emergiendo con el objetivo de revolucionar la aviación sostenible. Uno de los más notables es el proyecto "Solar Impulse", una iniciativa que demostró la viabilidad de vuelos impulsados completamente por energía solar. Este proyecto, liderado por Bertrand Piccard y André Borschberg, logró dar la vuelta al mundo en un avión alimentado únicamente por energía solar, estableciendo un precedente para el futuro de la aviación sin emisiones.[27]

La transición hacia una aviación sostenible es un desafío monumental que requiere la colaboración de todos los científicos e investigadores, la industria aeronáutica –desde fabricantes de aeronaves hasta aerolíneas–, los inversores en tecnología y, quizás lo más importante, las entidades reguladoras y los gobiernos. Las innovaciones tecnológicas en sistemas de propulsión, como motores eléctricos e híbridos, junto con avances en el diseño de aeronaves y el uso de combustibles sostenibles, ofrecen un camino claro y muy prometedor hacia la reducción de las emisiones y, eventualmente, hasta la descarbonización. Sin embargo, para que estas soluciones se implementen de manera efectiva y a gran escala, es fundamental contar con políticas de incentivos y regulaciones robustas. Los subsidios gubernamentales para el desarrollo y la adopción de tecnologías limpias, junto con impuestos sobre las emisiones de carbono, pueden crear un entorno económico que favorezca la sostenibilidad de una forma competitiva.[28] Además, los acuerdos internacionales y los esquemas de compensación de carbono, como CORSIA, impulsado por la ONU, son esenciales para garantizar una reducción global y coordinada de las emisiones.[29] En última instancia, la combinación de esfuerzos tecnológicos, operativos y regulatorios será clave para alcanzar una aviación sostenible, que cumpla con los objetivos globales de emisiones.

Ejemplos de prácticas de selección de fuentes de energía para la aviación

Opciones SAF	Materia prima	Emisiones reducidas	Pros / Contras
HEFA - Ésteres y ácidos grasos hidroprocesados	Grasas usadas. Aceites. Grasas refinadas para convertirlas en combustible (HEFA-SPK).	Podría reducir los GEI (gases de efecto invernadero) hasta en un 80% (en comparación con los combustibles fósiles)	Ventajas: Tecnología madura ampliamente utilizada. El tipo de SAF más económico. Desventajas: Problemas de disponibilidad de materia prima. Vulnerable a las presiones de la cadena de suministro.
ATJ - SPK - Alcohol para queroseno sintético parafínico a chorro	Los alcoholes como el etanol y el butanol se desoxigenan y se convierten en combustible mediante un proceso patentado.	Podría reducir los GEI hasta en un 80% (en comparación con los combustibles fósiles)	Pros: Tecnología madura / Capital fácil Contras: Alto "costo de oportunidad" para vender a modos alternativos (carretera)
FT-SPK y FT-SKA: procesados por Fischer-Tropsch	Los residuos sólidos urbanos y forestales se convierten en combustible con un proceso patentado.	Podría reducir los GEI hasta en un 80% (en comparación con los combustibles fósiles)	Ventajas: Es posible obtener tasas de mezcla más altas con JetA1. Desventajas: Problemas de disponibilidad de materia prima y problemas en la cadena de suministro.
CHJ - Hidrotermólisis catalítica Combustible para aviones	Aceites de plantas y algas convertidos en combustible por hidrotermólisis.	Podría reducir los GEI hasta en un 80% (en comparación con los combustibles fósiles)	Pros: Adecuado para procesamiento de biomasa húmeda Contras: Tecnología inmadura
PTL - Poder a líquido	La energía renovable definitiva: agua y carbono convertidos en combustible mediante electrólisis.	Los combustibles PTL (eFuels) podrían reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 90%.	Ventajas: Gran oferta de materias primas. Combustible muy limpio. Desventajas: Consumo intensivo de energía. Requiere electricidad limpia y captura de carbono.

Fuente: Wingtalkers

Una nueva plataforma para volar

EN ACCIÓN

Si la aviación fuera un país, se ubicaría entre los 10 principales emisores mundiales de CO2, aunque en realidad sólo representa el 2% de las emisiones de gases de efecto invernadero y un vuelo genera hoy la mitad de CO2 que en 1990.[30] El sector ha registrado 40.523 patentes tecnológicas para la mitigación del cambio climático desde 1987, la mayoría de ellas en la categoría de tecnologías de propulsión eficiente, con EEUU claramente destacado en cabeza.[31] Pero se le está pidiendo, a nivel mundial, algo equiparable a una verdadera reconversión industrial. Los Estados miembros de la OACI (International Civil Aviation Organization) adoptaron el objetivo colectivo aspiracional global a largo plazo (LTAG) de alcanzar emisiones netas de carbono cero para 2050.[32] En paralelo, un grupo 25 aerolíneas, que representan más del 30% del tráfico aéreo mundial de pasajeros, ya se han comprometido con la iniciativa Science Based Target[33] para lograr emisiones netas de carbono cero. Además de los efectos combinados que incrementan el impacto de sus emisiones, de los que se ha hablado en el capítulo anterior, la razón por la que la aviación se sitúa bajo el foco en materia de sostenibilidad tiene que ver con las expectativas derivadas de la previsión de incremento de los viajes aéreos.[34]

En la Unión Europea, la aviación limpia recibe ya la consideración de actor central vinculado a la competencia global de su economía, ya que emplea a 13,5 millones de personas (el 3,6% de todo el empleo en Europa) y genera una actividad económica de un billón de euros (el 4,4% del PIB europeo).[35] La industria de la aviación del Reino Unido ha calculado[36] que el objetivo de emisiones netas cero en 2050 de la OACI requerirá ahorrar casi 70 millones de toneladas de dióxido de carbono (MtCO2). Para lograrlo, confía en el poder coercitivo que pueden tener los costes de descarbonización en la demanda si se traslada al mercado la potencial subida de precios. Entre ellos se incluyen los costes de explotación asociados a las mejoras tecnológicas de las aeronaves, dirigidas a reducir el consumo de combustible y recortar las emisiones de CO2 entre un 30% y un 40% respecto a 2019. Se estiman entre los 710.000 y 740.000 millones de dólares para las líneas aéreas hasta 2050, lo que provocará muy probablemente una subida del precio de las aeronaves. También habrá que considerar los costes vinculados al mayor precio del SAF (Sustainable Aviation Fuel), que la Unión Europea está subsidiando, y a la exigencia cumplimiento de esquemas de compensación y comercio de carbono globales y regionales como CORSIA[37] y los ETS2 de la UE.[38] Las exigencias de Bruselas en relación con el SAF se endurecerán a partir de 2030. Los aeropuertos de la UE deberán ofrecer un 2% de combustible sostenible en 2025 e ir incrementando ese porcentaje cada cinco años hasta alcanzar el 63% en 2050. Forma parte de un programa ambicioso liderado por la Empresa Conjunta de Aviación Limpia (CAJU) orientado a desarrollar nuevas tecnologías aeronáuticas disruptivas, en apoyo del Pacto Verde Europeo y del objetivo de neutralidad climática en 2050.

Europa quiere una reducción neta de los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por la aviación de no menos del 30% en relación a 2020. Para conseguirlo contempla el despliegue de los nuevos aviones con emisiones netas de CO2 hasta un 90% inferiores a los actuales no más allá de 2035, de modo que se haya reemplazado el 75% de la flota de aviación civil mundial en 2050.[39] Las posturas de las distintas administraciones no son, sin embargo, homogéneas. Suecia, Noruega y Francia tienen planes incluso más ambiciosos que la UE en materia de SAF, mientras Estados Unidos se ha fijado un objetivo de producción de sólo 11.000 millones de litros al año en 2030 (California se ha desmarcado y quiere alcanzar el 20% del suministro). El Departamento de Transporte de Reino Unido financia parcialmente un proyecto liderado por Virgin Atlantic llamado Flight100 en el que participan el Imperial College London, la Universidad de Sheffield, Boeing, Rolls-Royce, BP y otros, para demostrar que el SAF es una alternativa al combustible regular para aviones.[40] Con una previsible voluntad de liderazgo del nuevo entorno, la compañía Emirates, que completó con éxito el primer vuelo de demostración 100% propulsado por SAF, en asociación con Boeing y GE, ha creado un fondo de 200 millones de dólares, en línea con la Hoja de Ruta Nacional de Combustible de Aviación Sostenible lanzada por Emiratos Árabes Unidos en 2023.[41]

En los próximos diez años el sector destinará más de 50.000 millones de dólares a proyectos de aviación sostenible.[42] En Estados Unidos, la Ley de Reducción de la Inflación incluye cientos de miles de millones de dólares en

incentivos para tecnologías bajas en carbono, y eso incluye a las SAF y a la producción de hidrógeno destinado al sector aéreo. Para estimar la dimensión del desafío puede servir de referencia el cálculo que ha llevado a cabo la aviación británica: sus previsiones para evitar los mencionados 70 millones de MtCO2 en los que se incrementarán sus emisiones en 2050 si se confirma el crecimiento del 78% de su actividad y el escenario no mejora, son que, además de la progresiva introducción del SAF, también será necesario recortar 2,5 MtCO2 con una mejor gestión del tráfico aéreo y procedimientos operativos; 9,5 MtCO2 gracias a la introducción de nuevas versiones de las aeronaves actuales y la aparición de modelos con diseños más eficientes; 10,6 MtCO2 de la mano de futuros tipos de aviones como los eléctricos y de hidrógeno; 26,4 MtCO2 por el efecto de los combustibles de aviación sostenibles; y 8,8 MtCO2 con eliminaciones permanentes de carbono.

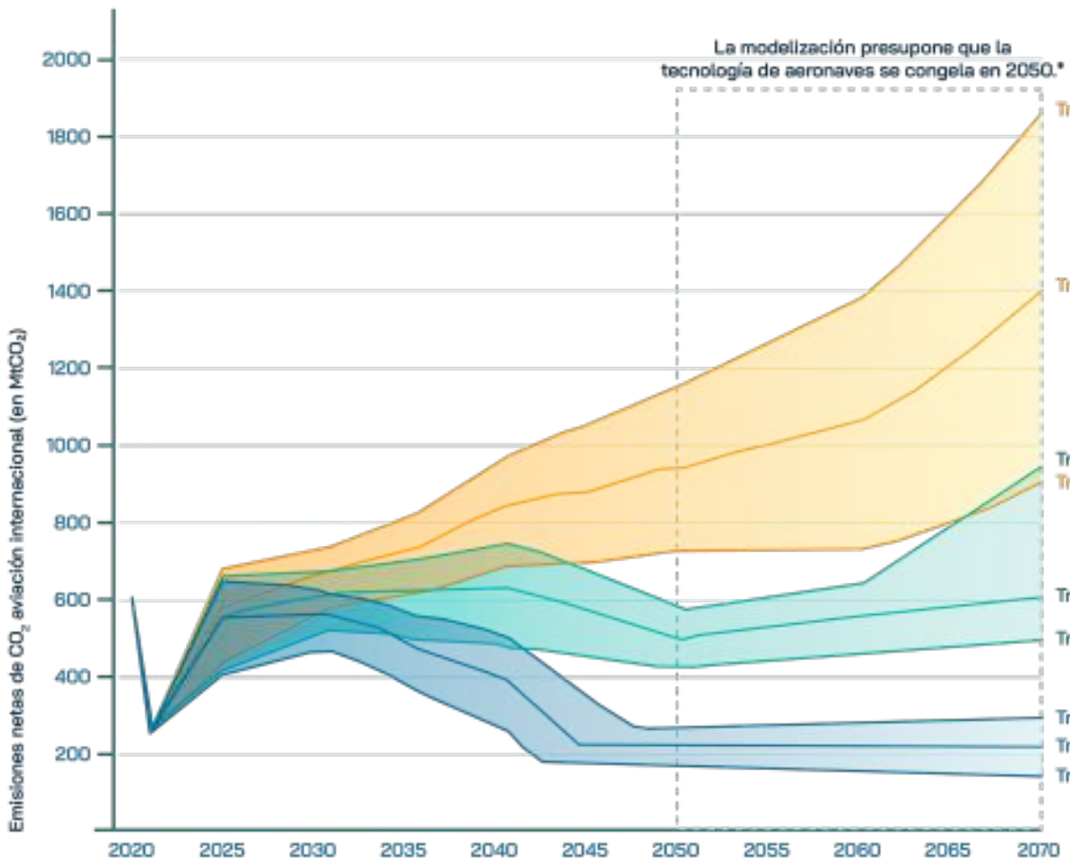
La acción estratégica debe extenderse a gran escala e implicar a todas las áreas de los gobiernos. Se necesitará garantizar, por ejemplo, suficiente generación eléctrica e hidrógeno verde. De nuevo en Reino Unido, Sustainable Aviation pronostica que harán falta un máximo de 147 TWh adicionales en energía renovable en 2050.[43] La clave es que ninguna de las soluciones barajadas alcanza las cero emisiones de CO2 sólo con mejoras en tecnologías, operaciones y combustibles directamente aplicables a la aviación, ya sea en aerodinámica, sistemas, estructuras, materiales o propulsión. Hay que considerar los aspectos colaterales relacionados con todo el ciclo de vida de cada uno de esos componentes y la tasa general de crecimiento del tráfico. En ese sentido, considerando el impacto ambiental de su producción y distribución, no sólo su uso para alimentar los motores de los aviones, la contribución neta esperada del hidrógeno en 2050 se reduce a tan solo el 1,9% en el total de energía.

En la última década, han entrado en servicio y en proceso de certificación aviones avanzados de doble pasillo y largo alcance con mejoras significativas en todas estas áreas tecnológicas críticas para la sostenibilidad, como los Boeing 787-9 y -10, los Airbus A350-900 y 1000, y los Boeing B777- 9 con ala compuesta. Lo mismo ha sucedido en el segmento de los aviones de pasillo único, como el Airbus A220-100 y -300, algunos con mejoras tecnológicas sustanciales en propulsión y fuselaje, como el Airbus A320neo, A321XLR y A330neo, la familia Boeing B737MAX y los Embraer EJets E2. Todos ellos representan el estado del arte en el diseño de aviones turbofan y son referencia para los desarrollos que tienen lugar en países como China (C919), Japón (Spacejet) y Rusia (MC21), y en los hangares de fabricantes como Bombardier (Global 7500), Dassault (Falcon 8X) y Gulfstream (G650 y G700).[44]

Estos movimientos demuestran que hay mucho margen de innovación más allá del combustible. Se puede conseguir, por ejemplo, una reducción significativa de la resistencia dependiente de la sustentación aumentando la envergadura efectiva de las alas, como vienen demostrando los trabajos de centros de excelencia como el Georgia Institute of Technology. Algunos fabricantes las están llevando a los límites especificados por la OACI, introduciendo dispositivos en la punta, para aumentar el tamaño efectivo manteniendo una carga aceptable, o habilitando mecanismos de punta de ala plegable para usar en tierra para no generar problemas con la infraestructura aeroportuaria existente. La tecnología de punta de ala plegable favorece asimismo la introducción del cuerpo de ala híbrido (HWB)[45] que no presenta una línea divisoria externa clara con el cuerpo principal del avión, puede tener cola y generalmente ubica el sistema de propulsión en la superficie superior, lo que también permite la reducción del ruido mediante blindaje acústico. Airbus incluyó una configuración HWB en uno de los tres aviones propulsados por hidrógeno ensayados en su programa ZEROe.[46] La posible entrada en servicio de esta tecnología se estima que podría producirse en el período 2035-40 y la reducción de energía estimada alcanzaría el 5-15%.[47] Adoptando un enfoque de alivio de carga, se puede facilitar también un aumento de envergadura sin una subida significativa del peso. Consiste en introducir movimiento en las superficies de control montadas en las alas, como alerones y spoilers, utilizando sensores y parámetros de control adecuados para limitar el momento de flexión de la raíz del ala.

Para hacer frente a la resistencia viscosa debida al perfil y la fricción superficial, la más elevada en las aeronaves convencionales, se están desarrollando métodos con geometrías robustas de microescala, pero su impacto en el consumo de combustible apenas alcanza todavía en el 1-2%. Ese valor puede aumentar manteniendo el flujo laminar en las áreas delanteras de las góndolas, alas y colas de los motores, mediante diseños estructurales y aerodinámicos bien equilibrados, como los que plantea, dentro del programa europeo Clean-Sky 2,[48] el proyecto BLADE (Breakthrough Laminar Aircraft

Escenarios de impacto del tráfico en las emisiones de CO2 a largo plazo



Hipótesis Integrada 1 (IS1): que refleja un "alto nivel de madurez/factibilidad y poca ambición". Representa la expectativa actual de las tecnologías, eficiencias operacionales, y combustibles que existirán en el futuro. Incluye las políticas habilitantes previstas para posibilitar las mejoras con poco cambio sistémico. Por ejemplo, sin cambios sustanciales de infraestructura. De las tres hipótesis, es la que demanda el menor esfuerzo para su concreción.

Hipótesis Integrada 2 (IS2): que refleja un "nivel medio de madurez/factibilidad y ambición intermedia". Esta hipótesis un poco más ambiciosa representa un punto aproximadamente intermedio entre las otras dos – un despliegue más veloz de tecnologías futuras, más eficiencias operacionales y más disponibilidad de combustibles. Presupone una existencia de más políticas habilitantes. De las tres hipótesis, esta exige un esfuerzo mediano para su concreción.

Hipótesis Integrada 3 (IS3): que refleja un "nivel bajo de madurez/factibilidad y una gran ambición". Esta hipótesis decidida y altamente ambiciosa representa el máximo esfuerzo posible en términos de despliegue de tecnología en el futuro, eficiencias operacionales y disponibilidad de combustibles. Presupone la existencia de las políticas habilitantes más categóricas; por ejemplo, cambios amplios y apreciables en infraestructura de energía y de aeropuertos. De las tres hipótesis, es la que exige el mayor esfuerzo para su concreción.

* Debe primar la prudencia al interpretar los niveles de emisiones absolutas de CO2, después de 2050 debido a los presupuestos de modelización, p.ej., tecnología de aeronaves congelada a partir de 2050. Por efecto de estos supuestos, las emisiones de CO2, son más altas que en una hipótesis (y criterio de modelización) de alternativa en la que la tecnología de aeronaves seguiría avanzando después de 2050.

Fuente: ICAO

EMMA FERNÁNDEZ

En los próximos diez años, las inversiones y las investigaciones clave se centrarán en la producción a gran escala de SAF, el desarrollo de baterías más ligeras y eficientes para la propulsión eléctrica, y la implementación de sistemas de gestión del tráfico aéreo más inteligentes. En gestión de Tráfico Aéreo, España tiene reconocido prestigio y está en condiciones de mantener el liderazgo. Inicialmente la adopción del SAF y su producción en masa concentrarán el grueso de las inversiones en innovación, pero no podemos desaprovechar las oportunidades en el resto de tecnologías antes mencionadas, ya que son transversales a todos los medios de transporte y en algunos casos estaríamos a tiempo de subirnos a la siguiente ola de innovación.

Demonstrator in Europe)[49]. Ya ha realizado pruebas de vuelo en un Airbus A340-300 con alas exteriores modificadas. Será necesario avanzar más en esta línea, pero ya se vislumbran ahorros en el consumo de combustible de las aeronaves de mayor tamaño de hasta el 5%.

En la batalla contra otras fuentes de resistencia, como las ondas de choque, las interferencias y las fronteras adversas, destaca el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) en las distintas etapas del proceso de diseño de las aeronaves, gracias al aumento de la potencia informática. Se puede modelar virtualmente con niveles cada vez mayores de fidelidad física a escala local y de aeronave,[50] aunque los progresos derivados de esta tecnología se concentran todavía en la etapa crucero. En este campo, el control activo de flujo (AFC), clave para abordar la interferencia en las aeronaves y los fenómenos de la capa límite, ha dado pasos de maduración significativos en la última década, incluidos los logros del programa EcoDemonstrator[51] de Boeing y las actividades en Europa de AFLoNext.[52]

La reducción de la masa estructural es otro de los parámetros clave para mejorar el rendimiento en el consumo de combustible. Los aviones están reemplazando los sistemas hidráulicos y neumáticos por sus equivalentes eléctricos y, en el ámbito de los fuselajes, se investiga en nuevos modelos, como los fuselajes de elevación no circulares y la "V voladora". Hay que seguirlos de cerca porque los aviones de fuselaje ancho generan el 45% de las emisiones del sector.[53] Junto a ello, se ahorrará peso abordando los materiales de la estructura, que constan de dos familias principales: compuestos (composites) y metálicos, en especial aleaciones de baja densidad. Ambos pueden verse beneficiados por las nuevas tecnologías de soldadura, para resinas termoplásticas, unión y costura, que incrementan su resistencia. Los grandes aviones de pasillo único y los B777 y A330 de doble pasillo y largo alcance tienen estructuras primarias en su mayoría metálicas, mientras que los B787 y A350 de doble pasillo tienen en su mayoría estructuras primarias compuestas. Los métodos de fabricación de capas aditivas, el grafeno y los conceptos estructurales biónicos, impulsados por la mejora de la simulación computacional, abren la puerta también a nuevas prestaciones de materiales más ligeros que los actuales. La pared lateral de Diehl Aviation es un caso de éxito en este sentido: incorpora un 9% de materiales de origen biológico y logra una reducción de peso del 10% en comparación con las tecnologías de flancos existentes.[54] Finalmente, la fabricación aditiva abre posibilidades para un diseño mejor optimizado para soportar cargas, al tiempo que reduce el peso en comparación con los componentes tradicionales que realizan la misma función. Tiene que superar la difícil prueba de las certificaciones, pero tecnologías como la inyección de fibras de carbono de la española Reinforce3D permiten producir componentes de aviación no metálicos más ligeros, pero igual de resistentes, con fabricación aditiva.[55]

Cada vez resulta más difícil mejorar la eficiencia térmica, que se sitúa ya en torno al 50-53%, pese a que resulta clave para minimizar el deterioro de los materiales forzados a operar a temperaturas muy elevadas. Se trabaja en tecnologías de turbomaquinaria que mitiguen las ineficiencias actuales en la operación y el enfriamiento de las turbinas a alta temperatura, para lo cual se han desarrollado superaleaciones de níquel y recubrimientos mejorados que permiten que las turbinas soporten los 1.700º C durante muchos miles de ciclos de vuelo. No se esperan mejoras radicales adicionales por esa vía, por lo que el foco se está desplazando hacia los compuestos de matriz cerámica, que generalmente pesan menos que sus componentes metálicos equivalentes, y hacia los nuevos materiales de sección caliente, como las cerámicas eutécticas y las aleaciones intermetálicas, que pueden funcionar a temperaturas más altas que las superaleaciones. El problema de estas últimas es que no se aplican fácilmente a componentes giratorios como los discos y, por lo tanto, se necesitarán tecnologías de sellado y enfriamiento.

Un área con gran potencial para mejorar la eficiencia es la combustión de volumen constante. Dado que la resistencia es proporcional al cuadrado de la velocidad de vuelo, está probado que volar más lento proporciona ahorros de combustible y aterrizar mediante un descenso continuo en un aeropuerto ahorra al menos 150 kg de CO2 por vuelo. En los aeropuertos, se trabaja, de hecho, en las llamadas "salidas verdes", que ayudan a los aviones a despegar y ascender a un ritmo constante. Pasar de 1.037 a 864 km/h permitiría un ahorro de combustible del 13,1%, con la circunstancia añadida de que 11,4 puntos de ese ahorro se obtienen a 913,7 km/.[56] El estudio Subsonic Ultra Green Aircraft Research (SUGAR)[57] ha apuntado que si el objetivo fuera igualar los ratios de consumo de combustible de la NASA, la velocidad de crucero del avión debería ser de 740 km/h. Pero los criterios económicos han impuesto una velocidad mínima de 864 km/h: volar más lento aumentaría los costes operativos de las aerolíneas al reducir la disponibilidad de las aeronaves.

Alternativas posibles en la arquitectura de los aviones

Fuente: ICAO

En materia de motores, las nuevas fuentes de energía inducirán cambios importantes en las arquitecturas de los aviones, al menos en el caso de los propulsados por hidrógeno que podrían ser más lentos y operar en distancias más cortas, al decantarse por diseños de turbohélice.[58] Los motores convencionales avanzados tienen conductos, como el UltraFan de Rolls-Royce, diseñado para satisfacer las necesidades de los mercados de fuselaje ancho, que se ha marcado el reto de conseguir una reducción del consumo de combustible del 20%, en su versión UltraFan H2. Pero gana fuerza una alternativa revolucionaria llamada ventilador sin conductos o motor de rotor abierto, que alcanza velocidades de carga y crucero más altas que con hélices. Se viene investigando en ello en Europa y Estados Unidos desde hace décadas, pero ha sido la norteamericana CFM la primera en anunciar[59] planes de demostración de tecnología dentro de su programa integrado de Innovación Revolucionaria para Motores Sostenibles (RISE). Es significativo que los primeros ensayos en tierra vinieran propiciados por el programa Clean Sky de la UE, pero una empresa de EEUU ha logrado adelantarse en el mercado. Sus principales inconvenientes a la vista son la contención de las palas, la instalación y el tratamiento del ruido de la cabina, que conducirán a una penalización de peso en la aeronave, por lo que no se espera que esté disponible antes de 2035.

Como se ha dicho, entre los condicionantes clave para escalar el modelo de aeronaves electrificadas se encuentra la densidad de potencia de los sistemas de almacenamiento de baterías, aproximadamente de dos órdenes de magnitud menor que la del combustible para aviones,[60] y el alto peso de muchos componentes, así como los efectos de la altitud o algo tan primario como garantizar un nivel de acceso a la energía eléctrica masivo en los aeropuertos. Se están investigando soluciones creativas para el almacenamiento de baterías de aviones, incluidos los estudios de la NASA sobre aviones multifuncionales en los que la estructura sirve simultáneamente como batería,[61] modificaciones que pueden ayudar a mitigar las limitaciones actuales en términos de alcance, carga útil y velocidad.

Cuando estacionan en el aeropuerto, los aviones deben tener energía para proporcionar aire acondicionado y electricidad y también para arrancar los motores, para lo cual están equipados con un pequeño generador en la cola llamado unidad de potencia auxiliar (APU). Muchos aeropuertos ofrecen energía eléctrica fija en tierra y aire preacondicionado, para que los pilotos puedan apagar la APU mientras están en tierra. Los aviones pequeños totalmente eléctricos o híbridos-eléctricos, la opción que dominará en un principio,[62] como el E-Fan X que desarrollan Rolls-Royce, Airbus y Siemens, muestran todavía una enorme dependencia de los combustibles sintéticos. Podrían estar en servicio antes de 2035 y abrir la puesta a los modelos de mayor tamaño a partir de 2050.

Conforme se acerca su generalización, irrumpen nuevos modelos de negocio que transformarán la aviación: la norteamericana Ampaire[63] se quiere posicionar en la aviación híbrida-eléctrica y a principios de 2024 sumaba ya casi 30.000 kilómetros recorridos; otras, como la canadiense Azzera, ofrecen una plataforma B2B de software que permite a las aerolíneas y a los gobiernos gestionar las emisiones. El proyecto europeo FUTPRINT50 pretende acelerar las tecnologías de electrificación para la aviación centrándose en el almacenamiento y recolección de energía y la gestión térmica. Su intención es plasmarlo en un avión híbrido-eléctrico de hasta 50 asientos 2035.[64]

La lucha por la sostenibilidad tiene también como aliado al software. La inteligencia artificial (IA) se utilizará para capacitar a pilotos, proporcionar mejores datos de vuelo en tiempo real y predecir los patrones de reserva de los clientes, de modo que las aerolíneas puedan gestionar mejor los recursos. ¿Les seguiremos llamando pilotos? ¿O, dados los niveles de autonomía de los aviones de nueva generación, deberían redefinirse como operadores de sistemas? Son algunas de las preguntas que se formula la Empresa Conjunta SESAR 3 (SESAR-JU)[65] impulsada por la Comisión Europea. Una línea de investigación clara busca aprovechar las condiciones climáticas a gran altura. Los pilotos y los planificadores estudian los patrones de viento antes de la salida y dirigen el avión hacia las corrientes más potentes para reducir el tiempo de vuelo y las emisiones. Se ha demostrado que los vuelos de Nueva York a Londres podrían ser hasta un 16,4% más cortos[66] y que las rutas de vuelo actuales tienen distancias aéreas que suelen ser varios cientos de kilómetros más largas que las optimizadas con combustible. Los ahorros potenciales de distancia aérea oscilan entre el 0,7% y el 7,8% cuando se vuela hacia el oeste y entre el 0,7% y el 16,4% cuando se vuela hacia el este.[67]
Las rutas flexibles se usan ya en trayectos largos y poco concurridos, pero cobra protagonismo una nueva tecnología de vigilancia, similar al GPS, para las más congestionadas, al tiempo que se mejora el diseño de las rutas de vuelo más apropiadas hacia los aeropuertos con aproximaciones a pistas difíciles, por ejemplo, en áreas montañosas. Esas técnicas de aproximación pueden ahorrar millones de toneladas de combustible y CO2. Eurocontrol está potenciando el uso de la IA dentro de los aeropuertos para tareas como la asignación de pistas minimizando el CO2, objetivo de un proyecto iniciado en el aeropuerto Charles de Gaulle de París, y la optimización de tiempos de respuesta mediante aprendizaje automático.[68]

En el área de ingeniería, el diseño paramétrico asistido por IA[69] está suponiendo toda una revolución. Los fabricantes más avanzados, como Airbus y Boeing, disponen de complejas infraestructuras de simulación y ecosistemas de entornos de prueba totalmente virtuales que utilizan para la fase de diseño, pero también para las de verificación y validación, por ejemplo, para identificar piezas que se pueden cambiar con menos frecuencia sin afectar los niveles de confianza. El sector no se mantiene, sin embargo, al margen del desafío que representa la brecha de talento en la informática mundial.[70]

Interés geográfico y turístico por la I+D

ESPAÑA

La posición geográfica de España y el peso del turismo en su economía convierten a la carrera tecnológica por la aviación sostenible en un asunto de máximo interés estratégico para el país. Pese a ello, la reacción de los principales actores ha sido relativamente reciente. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030[71] apenas menciona el desafío al referirse a la decisiva contribución de los biocarburantes al cumplimiento de los objetivos de reducción del consumo de combustibles de origen fósil en el sector del transporte por carretera y la aviación. El plan plantea un impulso específico de su producción, todavía escasa debido a la limitada disponibilidad de algunas materias primas y al bajo nivel de madurez tecnológica de algunos de los procesos que intervienen en la formación de los biocarburantes.

Conforme se acercaba el primero de los plazos establecidos por Bruselas, especialmente en lo que se refiere a la utilización del SAF, se han producido los primeros movimientos en regiones en las que el sector aeronáutico tiene una presencia significativa. El proyecto Madrid Vuela Sostenible es un consorcio liderado por Repsol, desde su centro de innovación, Technology Lab, ubicado en Móstoles, en el que participan también el centro de investigación de la Comunidad de Madrid, IMDEA Energía, la pyme tecnológica Ariema y la startup Evoenzyme. Por su parte, la Junta de Andalucía y el Ayuntamiento de Jerez de la Frontera colaborarán en la creación de un 'hub' de la industria aeronáutica centrado en la aviación sostenible con el que persiguen atraer el interés de empresas del ámbito de los nuevos combustibles y de las actividades de mantenimiento, reparación y operación.

Iberia realizó en 2021 el primer vuelo en España con biocombustible producido a partir de residuos en la refinería de Petronor, y ese mismo año Vueling hizo lo mismo entre Barcelona y Sevilla con SAF generado en Tarragona por Repsol a partir de biomasa. Un año después, Iberia operó en colaboración con Repsol sus primeros vuelos de larga distancia con este biocombustible desde Madrid a Washington, San Francisco y Dallas. Ambas compañías forman parte del hub de innovación tecnológica All4Zero. En julio de 2024, llegaron a un acuerdo[72] para el suministro de más de 28.000 toneladas de SAF, la mayor compra de este producto hasta la fecha en España. Desde febrero de ese año, el grupo tenía asegurado un tercio del SAF necesario para cumplir con su objetivo de utilizar un 10% de combustible sostenible en 2030.

La presencia en nuestro país de una potente base de empresas proveedoras de componentes de Airbus y, en menor medida, Boeing ha consolidado una capa de centros tecnológicos con niveles avanzados de investigación en el campo de los nuevos materiales alternativos al metal para la aviación sostenible. El Instituto Tecnológico del Plástico AIMPLAS ha creado junto a Tekniker una novedosa metodología para el tratamiento de fin de vida de estos materiales dentro del proyecto europeo SPARTA.[73] Su proceso aborda el reciclaje y posterior fabricación de composites termoplásticos como la polietercetonacetona (PEKK) de alto rendimiento reforzado con fibra de carbono continua, mediante deposición automática y reprocesado a través de moldeo por compresión.

En Castilla y León, los centros tecnológicos CIDAUT y CTME han desarrollado el interesante proyecto COMP_COAT,[74] junto a las empresas Aciturri Engineering y MPB Aerospace, ambas del sector aeroespacial, orientado a mejorar las propiedades de materiales composites y plásticos técnicos aplicando la tecnología de proyección térmica, que implica a cerámica y metales, en la superficie. Han analizado propiedades como la resistencia a la temperatura, el desgaste y la erosión, la conductividad eléctrica en superficie, la biocompatibilidad, y la protección UV de larga duración, entre otras. Como resultado del proyecto se han desarrollado distintos procesos para mejorar las funcionalidades de los composites y plásticos técnicos mediante proyección térmica con aplicaciones en diversos sectores industriales.

Relación de notas

[1] P Ke et al. **arXiv:2407.12447**, consultado el 20/07/2024.

[2] IEA (n.d.) "**Aviation**". Consultado el 20/07/2024.

[3] IATA (2024). "**Global outlook for air transport**". Consultado el 20/07/2024.

[4] "**Contrails and cirrus clouds from aviation**". Carbon Offset Guide, consultado el 20/07/2024.

[5] ICAO (2022). **"Impacts of Aviation NOx Emissions on Air Quality, Health, and Climate"**. Consultado el 20/07/2024.

[6] IPCC (1999). "**Aviation and the global atmosphere**". Consultado el 20/07/2024.

[7] "**Navigating the skies to net zero: Decarbonizing the aviation industry**". Chooose. Publicado el 15/12/2023. Consultado el 20/07/2024.

[8] DOE (n.d.). **"Sustainable aviation fuel"**. Consultado el 20/07/2024.

[9] M Prussi et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150, 111398, DOI: **10.1016/j.rser.2021.111398**.

[10] ICIQ (n.d.) "**Fotosíntesis artificial**". Consultado el 20/07/2024.

[11] Susana Twidale. "**Climeworks opens world's largest plant to extract CO2 from air in Iceland**". Reuters. Publicado el 08/05/2024, consultado el 20/07/2024.

[12] Kathryn Tso. "**How much is a ton of carbon dioxide?**" MIT Climate Portal. Publicado el 21/12/2023, consultado el 20/07/2024.

[13] Airbus (n.d.). "**Hybrid and electric flight**". Consultado el 20/07/2024.

[14] Casey Crownhart. "**This is what's keeping electric planes from taking off**". MIT Technology Review. Publicado el 17/08/2022, consultado el 20/07/2024.

[15] Bill Gates. "**We need a battery miracle**". GatesNotes. Publicado el 06/10/2011, consultado el 20/07/2024.

[16] Rolls Royce (2022). "**Rolls-Royce advances hybrid-electric flight with new technology to lead the way in Advanced Air Mobility**". Consultado el 20/07/2024.

[17] Fundación Rafael del Pino (2021). "**INTEC 2021: Diez tecnologías para impulsar a España**". Consultado el 20/07/2024.

[18] Tommaso Lecca. "**5 problems facing hydrogen-powered airplanes**". Politico. Publicado el 29/04/2024, consultado el 20/07/2024.

[19] Rachel Parkes. "**World first: German aviators fly liquid hydrogen-powered plane for three hours.**" Hydrogen Insights. Publicado el 07/09/2023, consultado el 20/07/2024.

[20] Maria Gallucci. "**The first hydrogen-powered planes are taking flight**". Canary Media. Publicado el 02/08/2023, consultado el 20/07/2024.

[21] Carbon Waters (2024). "**All the benefits of graphene for the aerospace industry.**" Consultado el 20/07/2024.

[22] Graphene Flagship (n.d.). **"Graphene for aviation"**. Consultado el 20/07/2024.

[23] Emily Newton. "**Why Are Advanced Materials the Future of Aerospace Design?**" Airways Magazine. Publicado el 23/08/2023, consultado el 20/07/2024.

[24] AirFrance-KLM (2023). "**Air France-KLM reaffirms its commitment to the decarbonization of aviation through the use of Sustainable Aviation Fuel (SAF)**". Consultado el 20/07/2024.

[25] British Airways (n.d.). "**Planet**". Consultado el 20/07/2024.

[26] Delta (2023). "**10 ways Delta made progress toward a more sustainable future of flight in 2023**". Consultado el 20/07/2024.

[27] Jim Clash. "**Bertrand Piccard Wins Explorers Medal For World Record Balloon and Solar-Powered Flights**". Forbes. Publicado el 28/01/2017, consultado el 20/07/2024.

[28] Kevin Soubly y Lauren Uppink. "**Decarbonising aviation requires a transition to sustainable fuel. Here's how governments can help.**" World Economic Forum. Publicado el 20/05/2021, consultado el 20/07/2024.

[29] ICAO (n.d.) "**Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation**". Consultado el 20/07/2024.

[30] "**Aviation benefits beyond borders**", Air Transport Action Group, septiembre de 2020

[31] Seçilmiş, N. Sustainable Aviation Based on Innovation. En: Kiracı, K., Çalıyurt, K.T. (eds) Corporate Governance, Sustainability, and Information Systems in the Aviation Sector, Volume I. Accounting, Finance, Sustainability, Governance & Fraud: Theory and Application, Springer, 2022, DOI: 10.1007/978-981-16-9276-5_6

[32] Maren Schöttler, **"Towards green aviation: PtX Hub contributes to the International Civil Aviation Organization (ICAO)'s ACT-SAF programme"**, ptx-hub.org

[33] **https://sciencebasedtargets.org/**

[34] Gianluca Gygax, "**These innovators are accelerating the aviation industry's transition to net-zero**", World Economic Forum, 16 de enero de 2024

[35] "**Clean Aviation Annual Forum 2024: there's no better time to invest in aviation's sustainable future**", Clean Aviation, nota de prensa, 25 de marzo de 2024

[36] "**UK'S leadership in sustainable aviation technology accelerates industry's transition to net zero**", Sustainable Aviation, 17 de abril de 2023

[37] **https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Brochure/CorsiaBrochure_SPA-Mar2019_Web.pdf**

[38] **https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/ets2-buildings-road-transport-and-additional-sectors_en?prefLang=es**

[39] Work Programe and Budget 2024-2025, Clean Aviation JU, 2024

[40] Caroline Brogan, "**World's first transatlantic flight on 100% sustainable aviation fuel takes off**", imperial.ac.uk, 28 de noviembre de 2023

[41] "**Emirates creates US$ 200 million aviation sustainability fund**", emirates.com, 11 de Mayo de 2023

[42] "**Accelerating sustainable aviation on the world's biggest stage**", McKinsey, 9 de agosto de 2023

[43] "**Sustainable Aviation Net Zero Carbon Road-Map**", Sustainable Aviation, 2023

[44] "**Report on the feasibility of a long-term aspirational goal (LTAG) for international civil aviation CO2 emission reductions**", OACI, marzo de 2022

[45] Zhenli Chen et al. **Assessment on critical technologies for conceptual design of blended-wing-body civil aircraft**, Chinese Journal of Aeronautics, junio de 2019, DOI: 10.1016/j.cja.2019.06.006

[46] **https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe**

[47] Craig L. Nickol, William J. Haller, "**Assessment of the Performance Potential of Advanced Subsonic Transport Concepts for NASA'a Environmentally Responsible Aviation Project,**" AIAA, 4-8 de enero de 2016, doi.org/10.2514/6.2016-1030

[48] **https://clean-aviation.eu/sites/default/files/2022-03/CS2DP-October-2021.pdf**

[49] Michael Gubisch, "**ANALYSIS: Why Airbus foresees laminar wings on next-gen aircraft**", FlightGlobal, 10 de julio de 2018

[50] Slotnick, J., Heller G., "**Emerging Opportunities for Predictive CFD for Off-Design Commercial Airplane Flight Characteristics**", Proceedings of the 54th 3AF International Conference

on Applied Aerodynamics, 2019

[51] **https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/principles/environment/pdf/BKG-ecoDemonstrator_2024_May.pdf**

[52] **http://www.aflonext.eu/**

[53] John Schmidt, David Silver, "**A shorter runway to net-zero**", Accenture, 23 de abril de 2022

[54] Diehl aviation's ECO Sidewall wins Crystal Cabin Award, diehl.com, nota de prensa, 28 de mayo de 2024

[55] Eugenio Mallol, "**Reinforce3D, impresión 3D para la fabricación avanzada**", El Periódico de España, 1 de junio de 2024

[56] T. Economon, S. Copeland, J. Alonso, "**Design and optimization of future aircraft for assessing the fuel burn trends of commercial aviation**", AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2011.

[57] M. Bradley, C. Droney, "**Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report**", NASA NASA CR 2011-216847, 2011

[58] Frederic Bouet, "**Making aircraft more energy-efficient**", Capgemini, 7 de junio de 2023

[59] Kelsey Reichmann, "**GE Aviation & Safran See Sustainability as Key for Next-Gen CFM Engine**", Aviation Today, 21 de junio de 2021de junio de 2024

[60] John S. Langford, David K. Hall, "**Electrified Aircraft Propulsion**", en The Bridge, National Academy of Engineering, 2020

[61] Brett Oakleaf et al. A Roadmap Toward a Sustainable Aviation Ecosystem, National Renewable Energy Laboratory, agosto de 2022

[62] Charles E. Lents, Zubair Baig, "**Parallel Hybrid Propulsion & Secondary Power System Architecture Exploration and Evaluation**", AIAA, 17 de agosto de 2020, doi.org/10.2514/6.2020-3555

[63] **https://www.ampaire.com/**

[64] "**Research & Innovation for Aviation**", Comisión Europea, junio de 2022

[65] Julie Garland, "**The future of Europe's aviation sector: embracing innovation**", Eurocontrol, 18 de marzo de 2024

[66] Neil Blanco, "**Operaciones sostenibles**", Capgemini, 7 de junio de 2023

[67] Cathie A Wells et al. Reducing transatlantic flight emissions by fuel-optimised routing, Environmental Research Letters, 26 de enero de 2021, DOI: **10.1088/1748-9326/abce82**

[68] "**Un nuevo tipo de innovación en la aviación: rápida, ágil y específica**", Eurocontrol, 7 de marzo de 2023

[69] "**Accelerating sustainable aviation on the world's biggest stage**", McKinsey, 9 de agosto de 2023

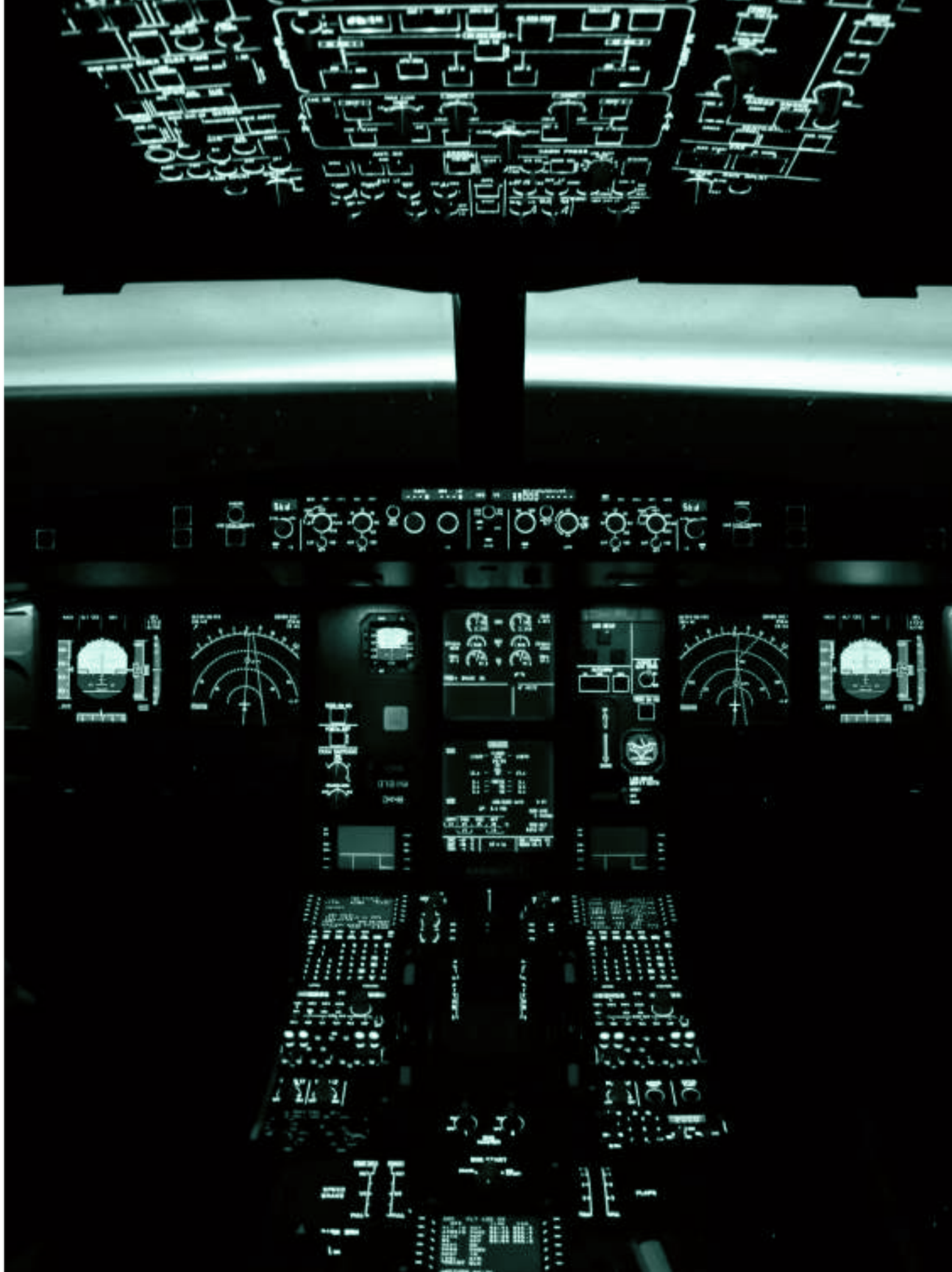
[70] Eric Chewning, Matt Schrimper, Andy Voelker, Brooke Weddle, "**Debugging the software talent gap in aerospace and defense**", McKinsey, 18 de julio de 2022

[71] **https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html**

[72] **https://www.repsol.com/es/sala-prensa/notas-prensa/2024/iag-y-repsol-acuerdan-la-mayor-compra-de-saf-en-espana/index.cshtml**

[73] **https://www.aimplas.es/blog/aimplas-crea-una-nueva-solucion-de-reciclaje-para-la-aeronautica-que-permite-reaprovechar-hasta-el-80-de-los-materiales-termoplasticos/**

[74] **https://www.cidaut.es/proyecto/comp_coat-investigacion-en-nuevos-recubrimientos-sobre-composites-y-plasticos-tecnicos-con-funcionalidaes-especificas-para-el-sector-transporte-y-biomedico/**



06

La era de los biocombustibles

La era de los biocombustibles

Desde el primer boom petrolífero a finales del siglo XIX, nuestra economía y nuestro modo de vida se han vuelto cada vez más dependientes de los combustibles fósiles.[1] La producción de petróleo no ha parado desde entonces, convirtiéndose en uno de los negocios más rentables de la historia. Según las estadísticas, las ventas de petróleo solo se han estancado un par de veces en los últimos 30 años, como consecuencia directa de grandes catástrofes mundiales como la pandemia de COVID-19.[2] Sin embargo, desde mediados de la década de 1960 sabemos que quemar petróleo es perjudicial para el medio ambiente. La combustión de hidrocarburos genera dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero que causa el calentamiento global. Ante la llegada de la crisis climática, que puede tener consecuencias devastadoras para nuestro planeta y para nuestra especie, hay que recortar el uso de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo y apostar por combustibles más sostenibles. En este sentido, las energías renovables, como la energía solar y la energía eólica, desempeñan un papel fundamental, pero suelen estar asociadas a problemas de intermitencia, transporte y almacenaje. Por tanto, cabe explorar el diseño de nuevos combustibles sostenibles, similares en cualidades al gas natural, la gasolina y el petróleo, pero procedentes de fuentes renovables. Una de estas alternativas es el hidrógeno, que exploramos en detalle en el informe INTEC de 2021,[3] así como soluciones como los biocombustibles y los combustibles sintéticos, procedentes del reciclado y la revalorización del CO_2 emitido, entre otras fuentes. Este capítulo aborda los distintos tipos de combustibles sostenibles, los retos tecnológicos asociados a su desarrollo y algunas de las soluciones innovadoras para reducir las emisiones y diseñar alternativas renovables.

La naturaleza ofrece alternativas al petróleo

POR DENTRO

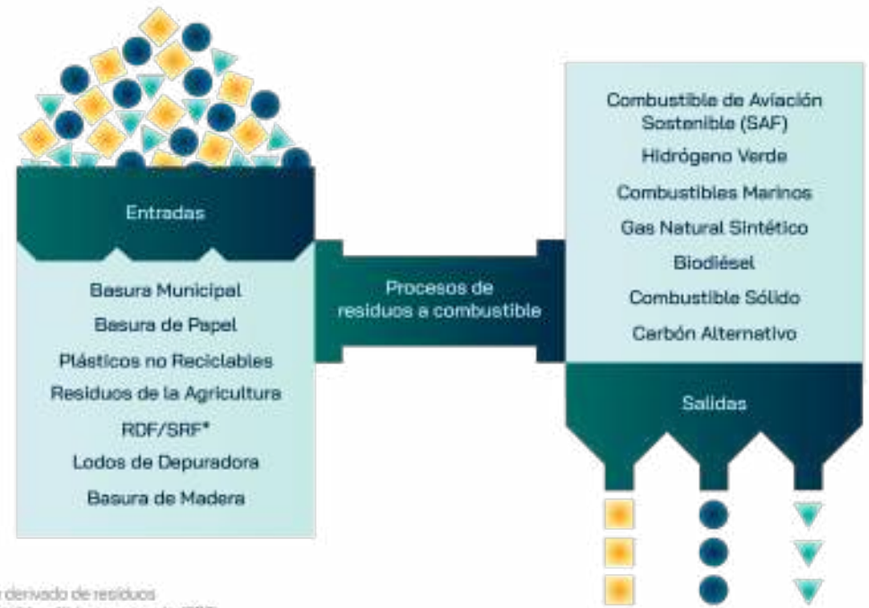
Una de las primeras alternativas al petróleo fueron los biocombustibles, derivados de la fermentación de los azúcares presentes de forma natural en plantas como el maíz, la remolacha y la caña de azúcar. Las plantas tienen la capacidad de capturar el dióxido de carbono y el agua directamente de la atmósfera y transformarlos en azúcares como la glucosa, la sacarosa y la celulosa, que luego podemos procesar a través de procesos químicos para convertirlos en combustibles como el etanol. El etanol (también conocido como alcohol etílico y bioetanol) tiene muchas ventajas frente a los combustibles fósiles, por ejemplo, es mejor antidetonante que los derivados del plomo en los motores tradicionales de combustión y, además, apenas genera productos secundarios al quemarse, más allá de CO_2 y agua, algo que reduce su impacto en la atmósfera y el medio ambiente.[4] Actualmente se utilizan dos tipos principales de bioetanol, conocidos como "primera" y "segunda" generación. El bioetanol de primera generación se produce a partir de cultivos alimentarios como el maíz. Aunque su producción es relativamente sencilla y económicamente viable, plantea preocupaciones sobre la competencia con la producción de alimentos y la sostenibilidad de los cultivos. Al utilizar grandes superficies de cultivo, toneladas de fertilizante y muchísima energía para recolectar, procesar y fermentar el maíz, el cómputo global de emisiones acaba siendo mucho más negativo que la utilización de combustibles fósiles. En términos de competencia, la producción de bioetanol de primera generación también es problemática: en EEUU, el 45% del maíz se utiliza para producir combustible, en vez de para alimentar animales y, sobre todo, personas (que tan solo acaban consumiendo el 5% del maíz cultivado).[5]

La alternativa del bioetanol de segunda generación es algo más interesante, dado que tan sólo utiliza materias primas no alimentarias como residuos agrícolas, residuos forestales y cultivos dedicados exclusivamente a la producción energética. El problema del bioetanol de segunda generación radica en la tecnología para convertir estos materiales, normalmente compuestos por lignina y celulosa, y no por azúcares sencillos, en combustibles. Estas reacciones requieren procesos químicos, térmicos y enzimáticos complejos antes de poder fermentar los productos para producir alcohol. No obstante, estos productos son mucho más interesantes desde el punto de vista de la economía circular, porque revalorizan productos de desecho.[6] Las proyecciones de mercado estiman un crecimiento de este tipo de combustibles de un 26% anual hasta alcanzar los 315.000 millones de dólares de cuota de mercado en 2030.[7] En España, empresas como Cepsa ya exploran esta tecnología que, combinada con otros productos como el biodiésel, es compatible con la mayoría de motores de combustión utilizados en agricultura y transporte.[8]

El biodiésel, que también entra en la categoría de biocombustibles, es un producto derivado de aceites vegetales, grasas animales y otros aceites reciclados mediante un proceso llamado transesterificación. Durante este proceso, los compuestos grasos, como los triglicéridos, presentes en los aceites y grasas, reaccionan con alcoholes para producir ésteres, los compuestos combustibles del biodiésel y glicerina, como subproducto. El biodiésel presenta numerosas ventajas en el contexto de la transición energética, sobre todo en comparación con el bioetanol. Por un lado, la producción a partir de aceites reciclados y grasas animales contribuye a la economía circular y reduce la dependencia de cultivos que compiten con la producción de alimentos. Además, el biodiésel puede utilizarse en muchos de los motores diésel existentes sin necesidad de modificaciones significativas, facilitando su adopción en el sector del transporte. Las políticas gubernamentales de apoyo, como incentivos fiscales y mandatos de mezcla con diésel tradicional, derivado del petróleo, ya están impulsando su viabilidad económica en regiones de Europa y Sudamérica. Asimismo, la investigación en nuevas materias primas, como las algas, que pueden cultivarse exclusivamente para producir biodiésel sin comprometer la alimentación animal y humana, podría mejorar aún más la sostenibilidad y eficiencia de este biocombustible como herramienta para diversificar nuestras fuentes de energía.[9]

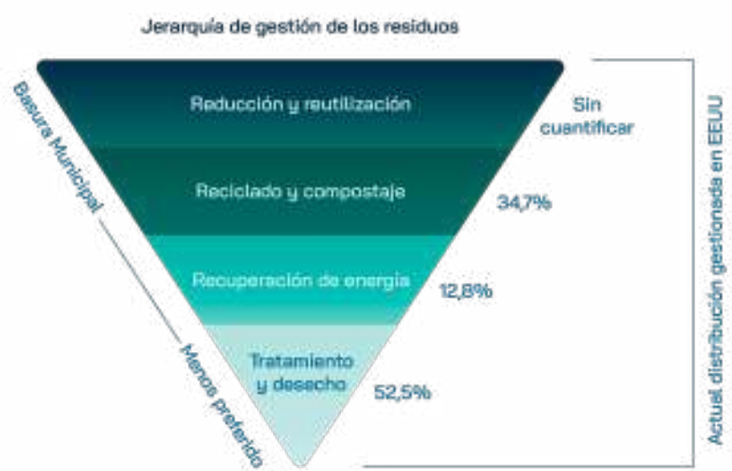
Imitando el proceso de las plantas, los seres humanos podemos llevar a cabo la llamada fotosíntesis artificial que, como la natural, utiliza CO_2,

La transformación de los residuos en biocombustibles



*Combustible derivado de residuos (RDF)/Combustible sólido recuperado (SRF)

Fuente: CPM



Fuente: USEPA

agua y energía para producir moléculas que almacenan energía y, por lo tanto, tienen un alto valor añadido. En este proceso, se utilizan materiales fotoactivos para absorber la luz solar y utilizar su energía para romper los enlaces en las moléculas de agua y dióxido de carbono, que luego se recombinan en compuestos como hidrocarburos y alcoholes, que pueden utilizarse como combustibles. Actualmente existen varios prototipos en escalas de laboratorio que funcionan y demuestran la viabilidad de esta tecnología, con eficiencias mayores a la fotosíntesis natural, lo que plantearía una alternativa muy atractiva a los biocombustibles tradicionales en términos de coste-efectividad.[10] Una de las principales ventajas de estos sistemas es que son prácticamente neutros en cuanto a emisiones de carbono, dado que el carbono que se libera a la atmósfera cuando se queman los combustibles sintéticos es exactamente el mismo que se ha utilizado en su preparación. Los problemas que plantea esta tecnología están relacionados, sobre todo, con los costes de producción y escalado. Entre otras cosas, los materiales y catalizadores utilizados en la fotosíntesis artificial deben ser estables a largo plazo bajo las exigentes condiciones operativas, lo que implica ofrecer una alta resistencia a la degradación y, al mismo tiempo, mantener su actividad catalítica. A día de hoy, los investigadores todavía están buscando los mejores para que estos procesos (y los combustibles sintéticos) puedan competir con los combustibles fósiles. Esto requiere avances en la síntesis de materiales, escalado de producción y optimización de procesos, además de una gran inversión en la exploración de nuevos catalizadores que no dependan de minerales escasos y procedentes de zonas conflictivas, para garantizar la independencia y seguridad energéticas.[11]

Del concepto de fotosíntesis artificial deriva también una serie de tecnologías más transversales, conocidas popularmente como “Power-to-X”, basadas en convertir electricidad, idealmente de fuentes renovables, en combustibles sostenibles y productos químicos de valor añadido. Esta conversión no solo permite el almacenamiento y transporte eficiente de la energía renovable, sino que también ofrece soluciones viables para descarbonizar sectores difíciles de electrificar, como el transporte pesado, la aviación y la industria química.[12] Uno de los enfoques más prometedores dentro de esta categoría es la tecnología Power-to-Gas (PtG), que convierte la electricidad en gases para combustión.

Otra de las opciones más sostenibles es la producción de hidrógeno verde mediante la electrólisis del agua. El hidrógeno producido puede utilizarse directamente como combustible, pero también puede recombinarse químicamente con dióxido de carbono (CO_2) capturado para producir metano (CH_4). Este metano sintético, idéntico al gas natural, puede inyectarse en

FERNANDO TEMPRANO

Los combustibles a partir de residuos contribuyen a aportar soluciones a algunos de los desafíos energéticos y medioambientales que tiene Europa. Por mencionar los principales, contribuye de forma directa a la gestión y minimización de residuos, al impulso a la economía circular, así como a la diversificación energética, con la consiguiente mejora de la seguridad energética...

la infraestructura de gas existente, proporcionando una solución flexible y sostenible para el almacenamiento de energía. Además, si el CO_2 procede de tecnologías de captura de carbono (bien captura directa del aire o captura de productos de la combustión en plantas químicas), el metano procedente de PtG podría considerarse climáticamente neutro, dado que el carbono formaría parte de un ciclo cerrado.[13]

El hidrógeno también puede utilizarse para producir otros productos para el almacenamiento de energía, así como atractivos para la industria química, como el metanol, el amoniaco e incluso hidrocarburos complejos, como ocurre en otra alternativa interesante dentro de las tecnologías Power-to-X denominada Power-to-Liquid (PtL). PtL puede convertir la energía procedente de electricidad renovable en combustibles líquidos, como la gasolina y el queroseno, mediante un proceso químico conocido como Fischer-Tropsch, que permite transformar hidrógeno y monóxido de carbono (una mezcla conocida como *syngas*) en hidrocarburos.[14] Los combustibles sintéticos producidos son compatibles con la infraestructura de transporte y almacenamiento existente, lo que facilita su adopción en los sectores de transporte y aviación sin necesidad de modificaciones significativas en los motores o en la infraestructura de distribución.

Una de las ventajas clave de las tecnologías Power-to-X es su capacidad para utilizar el exceso de electricidad de fuentes renovables, como la solar y la eólica, que a menudo producen más energía de la que puede ser consumida en tiempo real. Este problema, conocido popularmente como "intermitencia", podría tener solución si, durante períodos en los que se producen excesos de energía (bien sea por una demanda más baja o por una producción extraordinaria), el excedente puede convertirse en combustibles líquidos. Es una forma de almacenar energía diferente a las baterías, pero atractiva, dado que la infraestructura para aprovechar los combustibles líquidos ya está desarrollada.[15] Además, las tecnologías Power-to-X pueden considerarse sostenibles, dado que utilizan exclusivamente electricidad renovable para producir hidrógeno y reducir el CO_2. Cuando el CO_2 proviene de las diferentes tecnologías de captura, su ciclo cerrado contrasta con los combustibles fósiles, cuyo gran inconveniente es la liberación del carbono que lleva años almacenado geológicamente, lo que contribuye al aumento global de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero. Según el Foro Económico Mundial, las tecnologías Power-to-X son clave para la transición ecológica y conseguir la neutralidad climática en 2050. Es una innovación fundamental para transformar la luz del sol en combustibles para nuestros coches y nuestros aviones.[16]

La versatilidad de las tecnologías Power-to-X también se manifiesta en su capacidad para producir una variedad de productos químicos y materiales, además de combustibles. Por ejemplo, el hidrógeno producido puede utilizarse en la producción de metanol, un componente básico en la industria química, utilizado en la fabricación de plásticos, adhesivos y otros productos. A pesar de sus numerosos beneficios, las tecnologías Power-to-X todavía se enfrentan a varios desafíos, entre ellos el elevado coste de producción. Actualmente, producir hidrógeno verde, metano sintético y combustibles líquidos a partir de energías renovables todavía es más caro que extraer y procesar combustibles fósiles. Reducir estos costes requiere avances tecnológicos, economías de escala y políticas de apoyo que fomenten tanto la investigación y el desarrollo como la priorización de soluciones sostenibles, a través de subsidios y ayudas para favorecer su adopción y su competitividad.

Algunas previsiones son muy optimistas: en Dinamarca, por ejemplo, los expertos estiman que los combustibles sintéticos y el Power-to-X podrían suministrar suficiente energía como para cubrir todo el transporte nacional en 2025.[17] Pero seguramente la implementación a escala global llevará mucho más tiempo. Todavía es necesario mejorar la estabilidad, durabilidad y eficiencia de los materiales y catalizadores utilizados en estos procesos y desarrollar una infraestructura adecuada, lo que implica la construcción de plantas de electrólisis, instalaciones de captura de CO_2 y redes de distribución de hidrógeno y otros combustibles sintéticos.[18]

El desarrollo de la industria de combustibles sostenibles ofrece muchos beneficios, tanto en el plano económico como social. En términos económicos, la inversión en tecnologías de combustibles sostenibles puede generar un considerable número de empleos en sectores emergentes como la investigación y desarrollo, la ingeniería, la construcción y el mantenimiento de infraestructuras. Además, puede estimular el crecimiento económico al fomentar la innovación y la competitividad. Por supuesto,

FERNANDO TEMPRANO

|

(...) De esta manera, usando recursos locales específicos (los residuos) y aplicando tecnología e innovación local asociada a esa especificidad, se pueden reducir importaciones de combustibles fósiles contribuyendo a la creación de empleo y al desarrollo económico europeo. Su producción puede ayudar además a una industria vital para Europa como es la automoción, al impulsar la extensión de la vida útil del modelo de transporte con vehículos de combustión.

los beneficios de los combustibles sostenibles son igualmente significativos para la sociedad en general.[19] La reducción de la contaminación del aire tiene un impacto directo en la salud pública, dado que la exposición a contaminantes atmosféricos se asocia con enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Además, los combustibles sostenibles deberían mitigar los efectos del cambio climático, con unas profundas mejoras para el bienestar social. Los eventos climáticos extremos, exacerbados por el cambio climático, causan pérdidas económicas, desplazamientos de poblaciones y riesgos para la seguridad alimentaria y el acceso al agua. Los combustibles sostenibles podrían ayudar a proteger a las comunidades más vulnerables, al mismo tiempo que reducirían el extractivismo y mejorarían la estabilidad de los ecosistemas.[20] En resumen, la transición ecológica y económica hacia una producción circular y climáticamente neutra podría convertirse en un objetivo alcanzable y sensato gracias a los nuevos combustibles sostenibles.

Innovaciones a lo largo de la cadena de valor de los plásticos

Fuente: OCDE

APRENDIZAJE AUTOMÁTICO (MACHINE LEARNING) PARA CLASIFICAR LOS RESIDUOS PLÁSTICOS:

Para lograr un alto nivel de pureza, las técnicas avanzadas para clasificar los residuos plásticos ahora implican un "aprendizaje profundo", en el que se entrena a una máquina para reconocer diferentes tipos de plásticos y otros materiales. Por ejemplo, el aprendizaje automático se aplica actualmente para clasificar los residuos plásticos de equipos eléctricos y electrónicos, como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el poliestireno de alto impacto (HIPS), el polipropileno y el poliestireno cristal. Es especialmente útil para clasificar los plásticos oscuros que son difíciles de identificar mediante técnicas de infrarrojo cercano debido a la absorción de la radiación. A medida que aumenta la potencia de cálculo, se desbloquearán muchos nuevos algoritmos y aplicaciones en el futuro.

HERRAMIENTAS DE BLOCKCHAIN PARA FOMENTAR EL RECICLAJE:

La incertidumbre sobre la calidad de los plásticos clasificados es una barrera para los fabricantes de plásticos. Blockchain es una tecnología digital que permite el seguimiento detallado y la verificación de la información. La cadena de bloques puede hacer que la información que necesitan los fabricantes de plásticos sea accesible cuando la clasificación se combina con la inteligencia artificial impulsada por múltiples sensores y cuando una gran parte de los actores de la cadena de suministro están dispuestos a colaborar. Por ejemplo, Radical Innovations Group ha desarrollado una plataforma blockchain con contratos inteligentes que contienen datos validados sobre la fuente, el tipo, el color, la cantidad, el origen y el proceso de clasificación de los residuos.

BOLSAS DE LAVADO CON FILTRO PARA REDUCIR LA LIBERACIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN EL ORIGEN:

Se pueden colocar plásticos u otros textiles en la bolsa de lavado Guppyfriend para reducir el desprendimiento de microfibras durante el lavado. Después del lavado, las microfibras capturadas en la bolsa se pueden retirar y desechar en el contenedor de residuos residuales. La bolsa de lavandería está hecha de poliamida tejida con plástico y está diseñada para maximizar la facilidad de uso.

SISTEMAS AUTÓNOMOS DE ELIMINACIÓN DE FUGAS EN RÍOS Y OCÉANOS:

El Ocean Cleanup Interceptor 2.0 contiene barreras que guían los desechos plásticos flotantes hacia un barco que los recoge. El objetivo es capturar los plásticos filtrados en los ríos antes de que ingresen al océano. El barco funciona con energía solar, funciona de forma autónoma y puede almacenar hasta 50 metros cúbicos de basura.

NUEVOS MODELOS DE ENTREGA:

La innovación es algo más que nuevas tecnologías. Loop es un ejemplo de innovación organizacional en el que se cambia el modelo de negocio de un servicio de entrega para evitar los envases de un solo uso y reducir la huella ambiental general. Loop entrega pedidos en línea a los hogares en contenedores reutilizables que luego se recogen, se limpian y se rellenan.

Los nuevos pozos de extracción de energía limpia

EN ACCIÓN

Al tiempo que el mundo redescubre el potencial de los biocombustibles generados a partir de residuos, como alternativa a la movilidad eléctrica y a los combustibles fósiles, a los que conflictos como los de Ucrania y Oriente Próximo han dotado de una sensible carga geoestratégica, toma conciencia también del juego de equilibrios tecnológicos, de demanda y regulatorios que todavía hace falta articular para convertirlos en una posibilidad real a gran escala. A lo largo de 2024, la Agencia Internacional de la Energía estimaba que se produciría un incremento del 11% (18.000 millones de litros) de nueva demanda, pese a que en los mercados avanzados seguía siendo poco probable que las nuevas políticas causaran un impacto inmediato, debido a los precios elevados de producción de los biocombustibles, los problemas asociados a las materias primas y las limitaciones técnicas. Durante la década de 2030, los avances tecnológicos podrían estimular el crecimiento de nuevas vías para producir biocombustibles avanzados y combustibles electrónicos.[21] En ese sentido, la cartera de inversiones anunciada para aumentar la capacidad de producción de combustible sostenible ronda los 100.000 millones de dólares. Por productos, se verán impulsados de forma especial el biodiésel y etanol; por geografías, casi dos tercios de ese crecimiento de la demanda se va a producir en las economías emergentes, principalmente en India, Brasil e Indonesia. Dichos países han lanzado medidas políticas para aprovechar su posición de ventaja, que les permite superar los obstáculos tanto en lo que se refiere a acceso a materias primas como en costes y les da la oportunidad de reducir la dependencia de los productores de petróleo y, en el caso del país suramericano, de las refinerías de gasolina y diésel.[22]

Con visión de largo plazo, se espera que el crecimiento de la demanda de combustibles sostenibles en la década de 2040 estará asociado previsiblemente a la necesidad de descarbonizar las flotas existentes, de modo que, si bien las carreteras impulsarán su adopción en el corto plazo, los combustibles para la aviación y el transporte marítimo lo harán a partir de entonces. El HVO captará la mayor parte de estas inversiones a partir de 2030, una vez que se alcancen los límites de mezcla y de materias primas. Podrían situarse entre los 0,6 y los 1,9 billones de dólares hasta 2050, la mitad proveniente de la Unión Europea, EEUU y Canadá. Los productores de diésel renovable tendrán que actuar con flexibilidad ante la expectativa de demanda de SAF para aviación a gran escala a partir de 2030. Y las nuevas vías como el metanol, la gasificación-FT y el PtL, si se consolidan tecnológicamente, podrían representar alrededor de una quinta parte de la capacidad de producción de combustible sostenible anunciada a nivel mundial en 2030.[23] En 2050, se prevé que la demanda mundial de combustibles sostenibles oscile entre los 190 y los 600 millones de toneladas por año, según la ambición de las medidas que se adopten. En la actualidad, los biocombustibles convencionales, como el etanol y el FAME (éster metílico de ácido graso), constituyen la mayor parte de la oferta, pero se prevé que ese año su peso haya disminuido entre un 30% y un 60% con respecto a 2021 y se deriven a otros usos: el etanol, se puede convertir en queroseno de reemplazo.

El sector del biodiesel contribuye a un impacto económico total en Estados Unidos de 23.200 millones de dólares, 75.200 empleos y 3.600 millones de dólares en salarios.[24] El país ha diseminado sus acciones estratégicas para potenciar los biocombustibles por diversas regulaciones como la propia Ley de Reducción de la Inflación,[25] que incluye créditos fiscales por valor de 370.000 millones de dólares para la industria de las energías renovables; el programa de Asistencia Técnica para la Conversión de Residuos en Energía 2024[26] de la Oficina de Tecnologías de Bioenergía y el Laboratorio Nacional de Energías Renovables; y el Estándar de Combustibles Renovables.[27] Esta última ha recibido críticas por parte del sector de productores de biocombustibles que la acusaron, en una carta dirigida al presidente Joe Biden, de falta de ambición. Entre enero y abril de 2023, el biodiésel y diésel renovable generados en el país superaron en un 30% al acumulado durante el mismo período del año anterior, triplicaron las previsiones de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) para todo el año y cubrieron el objetivo marcado hasta 2025. En 10 estados norteamericanos se han comprometido inversiones privadas por valor de 5.000 millones de dólares para

ampliar o construir 20 instalaciones de procesamiento de semillas oleaginosas hasta mediados de la actual década.[28]

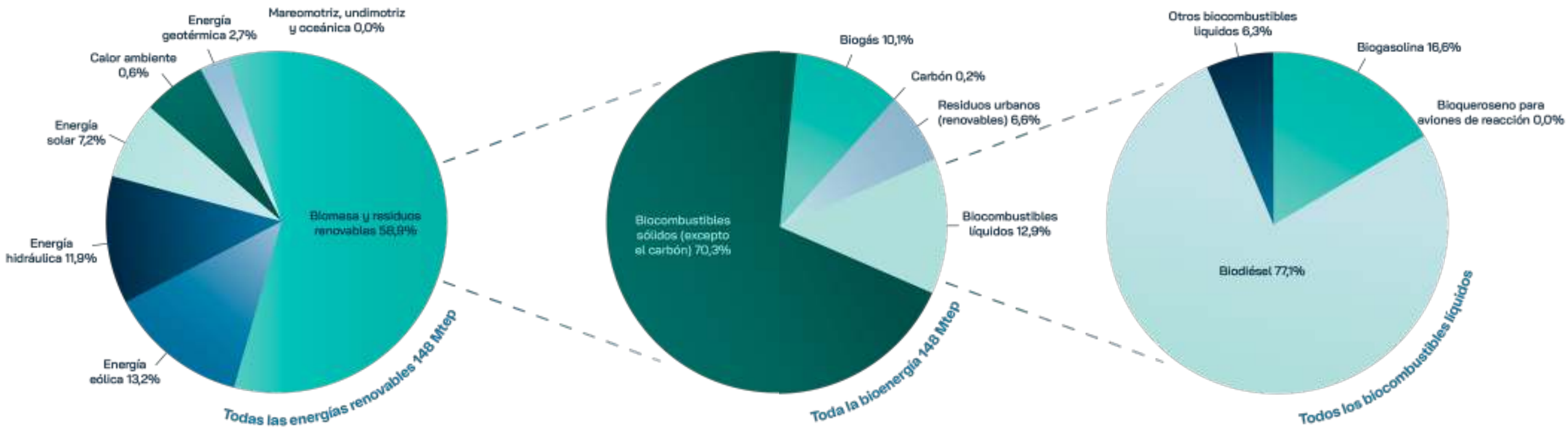
Los productores apuntan a la demanda como coartada principal y señalan a los datos que sitúan a los combustibles renovables como una opción incluso más realista para combatir el cambio climático que la tecnología de los vehículos eléctricos. Según un estudio del American Transportation Research Institute, una transición a vehículos eléctricos de batería para el transporte de larga distancia en EEUU costará más de un billón de dólares en infraestructuras eléctricas y costes de compra de vehículos durante 15 años. La apuesta por el diésel renovable permitiría lograr beneficios de CO2 similares con una inversión cinco veces inferior, de 203.000 millones de dólares. Las razones de esa brecha tan sustancial son que la distribución de diésel renovable resulta considerablemente más escalable que la de carga para vehículos eléctricos y que se puede implementar de inmediato en camiones sin apenas modificaciones, de modo que resultará más creíble para movilizar la I+D.[29] En la batalla por el relato acerca de las fuentes de combustibles limpios del futuro, ha entrado también el poderoso asunto de la calidad de vida. Cambiar al 100% de biodiésel en los sectores de transporte y calefacción doméstica evitaría 340 muertes prematuras al año y 46.000 días de enfermedad. Sólo en el sector del transporte, el riesgo de cáncer disminuiría un 45% si los camiones pesados usaran B100 y habría 203.000 ataques de asma menos.[30]

La Directiva de Energía Renovable (RED II)[31] de la UE tiene como objetivo que el consumo de fuentes de energía renovables en 2030 se sitúe en el 32%, para lo cual los proveedores de combustible deberán ser capaces de suministrar un mínimo del 14% de la energía consumida en el transporte por carretera y ferrocarril en 2030 como renovable. Sin embargo, hasta el Tribunal de Cuentas Europeo ha advertido de lo diferentes que resultan en la UE las tareas de planificar, regular y ejecutar. No existe una estrategia específica para los biocarburantes desde 2006 y ésta nunca se ha actualizado, lo que ha trasladado una sensación de inestabilidad al mercado poco propicia para la inversión y la transformación de los sectores potencialmente consumidores.[32] Recientemente, la regulación comunitaria ha introducido políticas para desalentar el envío de residuos a los vertederos, lo cual favorecerá el crecimiento de la industria. Pero uno de los grandes desafíos sigue siendo la paridad de los precios del etanol, el biodiésel y el diésel renovable con los de la gasolina y el diésel. El otro es reducir su dependencia del exterior, porque más del 40% del biodiésel consumido en la UE o las materias primas para producirlo se importaron en 2022. La política de subsidios de China a las exportaciones de biodiésel, denunciada por el European Biodiesel Board e investigada por la Comisión Europea,[33] podría estar aprovechando esa inmadurez del mercado para copar el mayor espacio posible a gran velocidad.

El Parlamento Europeo ha aprobado la Ley de Industria Net Zero (NZIA), que reconoce y fortalece el papel de la conversión de residuos en energía hacia una Europa más verde. Pero, según el principio de jerarquía de residuos de la UE, la reutilización y recuperación de materiales prevalece sobre la recuperación energética (Waste to Energy, WTE). El reto es conseguir que aquellos que no son económica o técnicamente reciclables no acaben en los vertederos y que el sector energético proporcione un sumidero seguro para las sustancias tóxicas que tanto preocupan a los reguladores.[34] Al fin y al cabo, el mundo tiene ahora más residuos sólidos urbanos que en cualquier otro momento de la historia. Sólo en Estados Unidos y en Europa se generan 300 millones de toneladas al año respectivamente, que se gestionan de tres maneras: reciclaje y compostaje (34,7%), conversión en energía (12,8%) y tratamiento y eliminación, principalmente en vertederos (52,5%). Con 76 instalaciones WTE en EEUU, 410 en Europa y muchas más en operación o planificadas en Asia, la tecnología se va consolidando por su huella de carbono significativamente menor que los vertederos y por el beneficio adicional que supone la destrucción de materiales contaminados que contienen patógenos y virus. Una de las consecuencias de su lenta implantación es, de hecho, el continuo incremento de volúmenes de residuos y de metano en los vertederos.[35]

Además, el Parlamento Europeo ha marcado objetivos sostenibles de mezcla de combustible,[36] especialmente para la aviación. Para que la bioenergía avance, según la AIE, la clave está en incentivar un mayor uso de desechos y residuos como combustibles, con América Latina, China y los países de la ASEAN, en el foco. Propone para ello medidas de reducción de riesgos, como garantías de préstamos para tecnología de conversión precomercial y cuotas de biocombustibles para combustibles emergentes.[37] La dimensión del mercado marcará también la velocidad a la que se desarrolle la

Consumo bruyo de energía renovable en la UE por tipo (2021, porcentaje y Mtep)[2]



Fuente: Comisión Europea

HÉCTOR PEREA

Los abundantes recursos de energía renovable en España en combinación con su tejido industrial, ofrecen una ventaja competitiva única para impulsar los combustibles sintéticos y el metanol verde en Europa.

España se presenta como un candidato ideal para liderar la producción de combustibles sintéticos gracias a su infraestructura industrial avanzada y su acceso a energías renovables abundantes como la solar y la eólica.

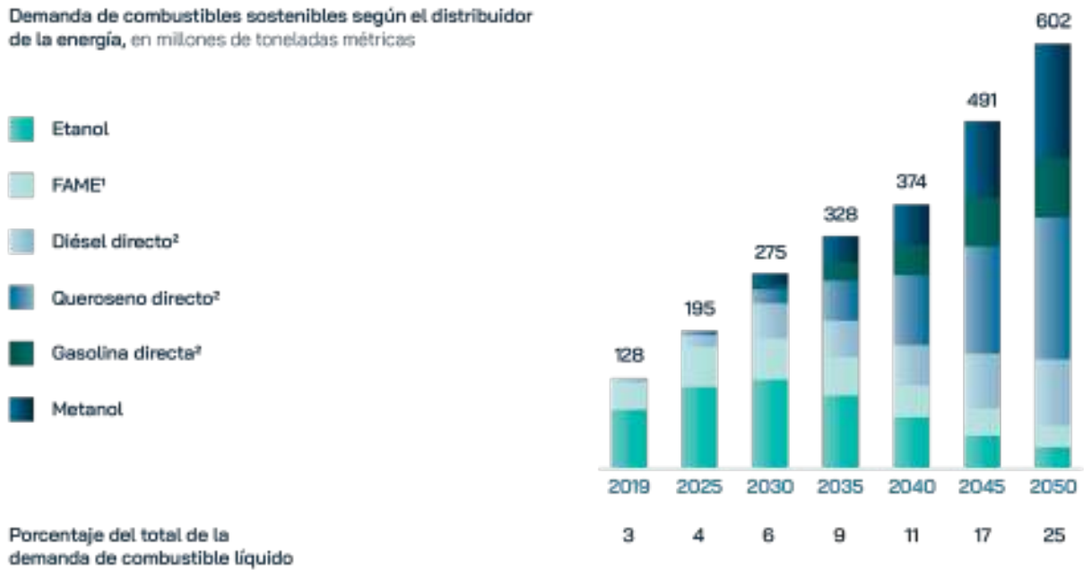
alternativa de los combustibles basados en residuos. La bioenergía producida a partir de materias primas de residuos agrícolas, forestales y orgánicos sigue siendo la principal fuente de energía renovable en la UE, con el 59%, y los biocombustibles líquidos sólo representan el 12,9% del total, un dato indicativo de las dificultades que todavía tiene que afrontar el sector.[38]

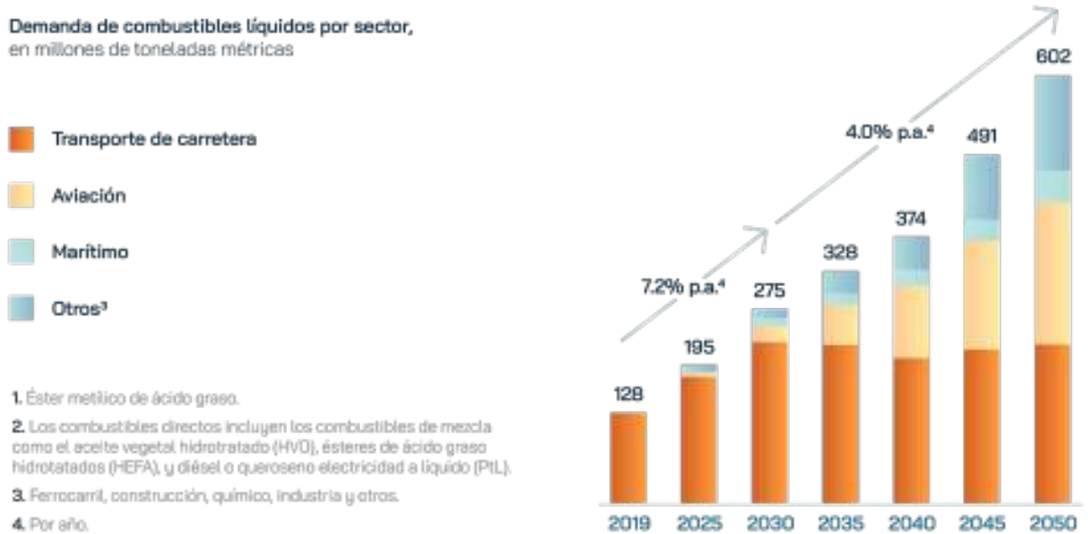
Reino Unido ha analizado en profundidad su situación actual y los datos muestran la vulnerabilidad de las economías avanzadas en este asunto. El 6,8% del combustible total para maquinaria móvil en ese país fue renovable en 2023, con un ahorro promedio de gases de efecto invernadero (GEI) del 82%, en comparación con los combustibles fósiles. No obstante, sólo el 11% de todo el combustible renovable verificado suministrado en el Reino Unido en este período se produjo a partir de materias primas de origen británico. Un dato relevante es que el 75% del biodiésel se produjo a partir de aceite de cocina usado (UCO), responsable ya del 42% del combustible renovable total, si se incluye también el HVO (aceite vegetal tratado con hidrógeno) y el SAF para aviación, mientras que el 49% del bioetanol se produjo a partir de maíz. El porcentaje de materias primas residuales para combustibles renovables ha aumentado constantemente con el tiempo y se situaba en el 66% en 2022 en el mercado británico. China se posiciona como una de las grandes potencias suministradoras, especialmente de UCO, mientras que Estados Unidos tiene una posición dominante en el maíz para bioetanol, con el azúcar de caña de Brasil en segunda posición. Los residuos sólidos municipales orgánicos son la fuente fundamental para obtener diésel de desarrollo, pero en Reino Unido el 87% de ellos los suministra también Estados Unidos, así como el 81% de los que permiten producir gasolina de desarrollo, combinados con el 16% que aportaron los neumáticos fuera de uso de Polonia y Suecia.[39]

Las materias primas son, en efecto, uno de los previsibles cuellos de botella de los combustibles renovables, ya que representan entre el 60% y el 80% del coste de producción. Los marcos de gestión de residuos, como la Directiva de la UE, el Plan de Gestión de Residuos de Inglaterra y el Libro Blanco noruego sobre la Economía Circular, admiten que los sistemas de gestión circular de residuos aún no han madurado.[40] Europa quema 130.000 barriles de aceite de cocina usado al día, ocho veces más de lo que recoge, y Estados Unidos, que triplicó sus importaciones en 2023, consume 40.000 barriles diarios.[41] Transport & Environment prevé que en 2030 los objetivos globales de producción de combustible de aviación sostenible requerirán al menos el doble de la cantidad de UCO del que pueden recolectar Estados Unidos, Europa y China juntos hoy, sin considerar el necesario para fabricar otros combustibles, especialmente el diésel renovable. Solo Ryanair necesitaría todo el UCO de Europa para operar el 12,5% de sus vuelos con combustible renovable como pretende hacer a partir de 2030. Y ahí es donde aparece de nuevo la sombra de la sospecha, porque recoger UCO en China es casi un 30% más barato que en Europa, otro de los asuntos que investiga Bruselas[42] por posibles prácticas desleales.

La escasez de materias primas podría llevar a la adopción de vías de producción más caras, como el uso de plantas lignocelulósicas. Al mismo tiempo, la generación de biocombustibles podría hacerse más regional, lo que podría conducir a una mezcla de comercialización global y fragmentación local, abriendo oportunidades para una variedad de combinaciones de materias primas, tecnología y combustibles. Cambios regulatorios, como la expiración de créditos IRA y una variación de los objetivos establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU y la Comisión Europea, podrían acentuar esta tendencia.[43] La innovación se presenta como la vía más clara para proponer alternativas al mercado. El proyecto europeo SmartCHP[44] modificó un motor diésel para que pudiera funcionar con el biocombustible suministrado desde una instalación de pirólisis rápida que convertía residuos orgánicos, como semillas de aceituna de Grecia, restos forestales de Suecia y agrícolas de Croacia, en bioaceite. La instalación de cogeneración con biocombustible funcionó en un laboratorio durante 500 horas, era la primera vez que se conseguía algo así.[45] En el proyecto de innovación WaveFuels, Organic Fuel Technology y otros socios han diseñado un nuevo proceso de microondas que puede convertir lodos de depuradora y otros materiales orgánicos en biocarbón y nuevos combustibles neutros para el clima como el bioaceite y el biocarbón. Si en la pirólisis tradicional la materia orgánica se calienta a entre 400 y 600 grados, su desarrollo opera a temperaturas más bajas, de 325-350 grados. La planta piloto se ubica en el parque industrial circular GreenLab en Skive y cuenta con el apoyo del Programa Danés de Demostración y Desarrollo de Tecnología Energética y del Energy Cluster Denmark. Organic Fuel Technology espera haber construido 30 plantas WaveFuels en Europa en 2035 y vender 500 sistemas en todo el mundo hasta 2050.[46] El Gobierno Metropolitano

Contribución prevista de los combustibles sostenibles a la demanda de combustibles líquidos en 2030





1. Éster metílico de ácido graso.
2. Los combustibles directos incluyen los combustibles de mezcla como el aceite vegetal hidrotratado (HVO), ésteres de ácido graso hidrotatados (HEFA), y diésel o queroseno electricidad a líquido (PtL).
3. Ferrocarril, construcción, químico, industria y otros.
4. Por año.

Fuente: McKinsey

de Tokio ha llevado a cabo en 2024 un estudio de viabilidad para producir combustible de aviación sostenible SAF a partir de residuos municipales en la ciudad.[47] Por último, el proyecto de conversión de residuos en metano en Dietikon (Suiza) produce gas sintético para calefacción, cocina y repostaje de vehículos con motores de gas natural comprimido (GNC), lo que reduce significativamente las emisiones de CO2.[48]

En última instancia, la pirólisis, la principal tecnología para convertir los residuos en combustible, se presenta como una alternativa ante el desafío de la emisión de CO2, especialmente cuando se trata de plásticos de desecho. El problema más apremiante no es el plástico como material, sino su ciclo de vida completo, y la OCDE espera que el uso mundial de plástico se triplique en 2060, hasta alcanzar los 1.231 millones de toneladas. La pirólisis de residuos plásticos mixtos emite un 50% menos de CO2 que la incineración y el producto resultante se puede refinar para obtener diésel y otros materiales petroquímicos. La selectividad se puede controlar mediante la adición de catalizadores como sílice-alúmina y zeolitas con intercambio de protones.[49] No obstante, la mayor parte de la descarbonización de vehículos de transporte pesado producida en EEUU se ha apoyado en los combustibles diésel basados en biomasa, totalmente compatibles con la infraestructura de combustibles refinados existente. Su producción en ese país superó los 12.400 millones de litros en 2023 y logra reducciones de emisiones de GEI en relación con el combustible diésel de entre el 39% y el 92%.[50] Curiosamente, el impacto global del diésel basado en biomasa en los precios del diésel número 2 a corto y medio plazo durante la década pasada varió de un año a otro, pero osciló entre una disminución del 8% a casi el 19%.[51]

La era de las grandes plantas de producción

ESPAÑA

Las grandes corporaciones energéticas vinculadas a los biocombustibles han movido pieza en los últimos años con anuncios de inversión ambiciosos. Cepsa construirá una nueva planta de biocombustibles de segunda generación en Palos de la Frontera (Huelva),[52] con una inversión de hasta 1.000 millones de euros. Producirá tanto diésel renovable como combustible sostenible para aviación (SAF) a partir de residuos orgánicos, como aceites usados de cocina o desechos agrícolas, entre otros. Por su parte, Repsol ha arrancado la producción de combustibles renovables a gran escala en su planta de Cartagena, la primera del país, en primavera de 2024. El objetivo es producir 250.000 toneladas de combustible para el transporte al año, para mejorar su distribución deberá aumentar los puntos de suministro, que a finales de 2023 eran apenas 50 entre sus 3.300 estaciones de servicio.[53] Repsol ha adquirido el 40% de tres plantas de biocombustibles del grupo Bunge en España y ha venido construyendo, además, una red de alianzas con compañías del ámbito de la movilidad como Iberia, Navantia, Alsa, Uber, Talgo y Grupo Sesé para desarrollar una respuesta multienergética que combine combustibles renovables, hidrógeno y electrificación. Junto a Alsa, líder en transporte de viajeros por carretera, pusieron en marcha una experiencia pionera en el uso de HVO en 12 autobuses de Bilbobus, el servicio de autobuses urbanos de Bilbao. Iberia realizó sus tres primeros vuelos de larga distancia entre Madrid y Washington, San Francisco y Dallas, utilizando biocombustibles avanzados producidos a partir de residuos orgánicos en la refinería de Petronor. En 2024, ambas compañías tenían previsto iniciar pruebas con combustible sintético fabricado en la planta de Repsol en Bilbao.[54] Entre el resto de iniciativas para generar biodiésel en nuestro país destaca la planta de BioVigo Energy en A Coruña, que utilizará residuos de aceites vegetales de cocina y grasas animales.[55]

El contexto regulatorio provoca todavía problemas en nuestro país para reforzar la demanda de biocombustibles. A mediados de 2023, la falta de reglamento para regular la entrada en vigor de la normativa de sostenibilidad ambiental Fuel Quality Directive (FQD) impedía establecer, entre otros asuntos, cuáles eran las mezclas de biocombustibles permitidas para cumplir con la obligación de reducir en un 6% las emisiones de GEI durante el ciclo de vida de los combustibles, marcada por el Real Decreto Ley 6/2022. Como consecuencia de ello, la Asociación Nacional de Productores de Biodiésel a partir de Residuos (Ewaba España) llegó a plantear una paralización de actividad.

Por el lado de la I+D, el único proyecto del programa Horizon 2020 coordinado por una entidad española fue FReSME, que lideró I-Deals Innovation & Technology Venturing Services, y planteó biocombustibles marinos en un diálogo tecnológico entre los sectores siderúrgico y naval. Por otra parte, debido a la gran complejidad y los elevados costes del proceso, menos del 0,1% de la biomasa se usa para producir biodiésel. En este sentido, el equipo del proyecto CONVERGE, en el que participa la española Campa Iberia, financiado con fondos europeos, ha validado una cadena de valor innovadora para la producción de biodiésel verde. El equipo de 4REFINERY, en el que participó Repsol, demostró que es posible producir biocombustibles avanzados en refinerías existentes sin necesidad de construir nuevas unidades. En el programa Horizon Europe, el Consorcio HYIELD, que incluye a la barcelonesa WtEnergy Advanced Solutions, H2Site, Veolia, Enagás, Eurecat, Cetaqua, Inveniam Group, CISC y La Farga, plantea liberar el potencial de los residuos que genera Europa para producir más de 30 millones de toneladas de hidrógeno verde, con destino a diversas aplicaciones industriales, como combustibles limpios, producción de fertilizantes e industria siderúrgica, entre otros.

Relación de notas

[1] BBC (n.d.). "How did oil come to run our world?" Consultado el 20/07/2024.

[2] Enerdata (2023). "Crude oil production". Consultado el 20/07/2024.

[3] Fundación Rafael del Pino (2021). "INTEC 2021: Diez tecnologías para impulsar a España". Consultado el 20/07/2024.

[4] Repsol (n.d.). "A renewable alternative as a fuel of agricultural origin". Consultado el 20/07/2024.

[5] "**John Oliver tackles the US corn industry: 'You might be thinking, so what?'**". The Guardian. Publicado el 20/05/2024, consultado el 20/07/2024.

[6] Katarzyna Robak y Maria Balcerek. Food Technology and Biotechnology. 2018, 56, 2, 174, DOI: 10.17113/ftb.56.02.18.5428.

[7] "Second-generation Biofuels Market Size to be Worth USD 314.5 billion by 2031." Transparency Market Research. Publicado el 08/07/2024, consultado el 20/07/2024.

[8] "Carreras and Cepsa sign agreement to promote renewable biofuels." Biofuels International. Publicado el 21/03/2024, consultado el 20/07/2024.

[9] DOE (n.d.). "Biodiesel Benefits and Considerations". Consultado el 20/07/2024.

[10] Rhys Blakely. "Artificial leaves make green energy with just water, sunlight and CO_2". The Times. Publicado el 25/08/2020, consultado el 20/07/2024.

[11] European Commission (n.d.). "Critical Raw Materials Act". Consultado el 20/07/2024.

[12] Ørsted (n.d.). "Power-to-X: Renewable hydrogen and other green fuels". Consultado el 20/07/2024.

[13] Ramboll (n.d.) "Power-to-X: paving the way for a greener future". Consultado el 20/07/2024.

[14] DOE (n.d.). "Fischer-Tropsch Synthesis". Consultado el 20/07/2024.

[15] "Power-to-X Technology: Is It Renewable Energy's Future?" Just Energy. Publicado el 10/01/2024, consultado el 20/07/2024.

[16] Kim Saaby Hedegaard. "See how Power-to-X could be a key component in the global energy transition". WEF. Publicado el 14/11/2023, consultado el 20/07/2024.

[17] Anne Kristen Federiksen. "When will Power-to-X come to fruition?". DTU. Publicado el 13/10/2022, consultado el 20/07/2024.

[18] R Daiyan et al. ACS Energy Letters. 2020, 5, 12, 3843, DOI: 10.1021/acsenergylett.0c02249.

[19] J Hill et al. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2006, 103, 30, 11206, DOI: 10.1073/pnas.0604600103.

[20] "The Social Impact of Biofuels: A Thought Leader's Reflection" Green.org. Publicado el 30/01/2024, consultado el 20/07/2024.

[21] Tapio Melgin, Agata Mucha-Geppert, Xavier Veillard, Andrew Warrell, **"How traders can capture value in sustainable fuels"**, McKinsey, 4 de octubre de 2023

[22] **"Will energy security concerns drive biofuel growth in 2023 and 2024?"**, IEA, junio de 2023

[23] Mikolaj Krutnik, Nathan Lash, Tapio Melgin , Agata Mucha-Geppert, Ole Rolser, "Global Energy Perspective 2023: Sustainable fuels outlook", McKinsey, 10 de enero de 2024

[24] **"Economic impact of biodiesel on the United States economy 2022",** LMC International, Clean Fuels Alliance America, noviembre de 2022

[25] **https://www.whitehouse.gov/cleanenergy/inflation-reduction-act-guidebook/**

[26] **https://www.energy.gov/eere/bioenergy/waste-energy**

[27] **https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program**

[28] **https://cleanfuels.org/wp-content/uploads/Clean-Fuels-RVO-Stakeholder-Letter_Jun23.pdf**

[29] **"ATRI Study Touts Renewable Diesel's Benefits"**, ttnews.com, 23 de abril de 2024

[30] **"Assessment of Health Benefits From Using Biodiesel as Residential Heating Oil"**, Trinity Consultants, National Biodiesel Board, marzo de 2021

[31] https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/reference-regulatory-framework/renewable-energy-recast-2030-red-ii_en

[32] **"El apoyo de la UE a los biocarburantes sostenibles en el transporte",** Tribunal de Cuentas Europeo, 2023

[33] **https://policy.trade.ec.europa.eu/news/european-commission-examine-allegations-unfairly-traded-biodiesel-china-2023-12-20_en**

[34] Alessandro Dal Pozzo, Mathieu Lucquiaud, Johan De Greef, "Research and Innovation Needs for the Waste-To-Energy Sector towards a Net-Zero Circular Economy", Energies, 2023 https://doi.org/10.3390/en16041909

[35] Marco J. Castaldi, "The Scientific Truth about Waste to Energy", City College of New York, mayo de 2021

[36] Fit for 55: Parliament pushes for greener aviation fuels

[37] "Will energy security concerns drive biofuel growth in 2023 and 2024?", IEA, junio de 2023

[38] "Bioenergy report outlines progress being made across the EU", Comisión Europea, 27 de octubre de 2023

[39] "Renewable fuel statistics 2022: final report", UK Government, 8 de noviembre de 2023

[40] **https://business.esa.int/funding/waste-to-energy**

[41] "UCO Imports: Unfair Competition with EU UCO Industry?", Transport & Environment / Stratas Advisors, 11 de junio de 2024

[42] "A Waste-Oil Crunch Is Coming for Renewable Fuel", ttnews.com, 18 de junio de 2024

[43] Tapio Melgin et al.

[44] https://cordis.europa.eu/project/id/815259

[45] Anthony King, "Waste not, want watts – turning waste into energy", Horizon, Comisión Europea, 15 de junio de 2022

[46] "WaveFuels presents version 2.0 of pyrolysis", Energy Cluster Denmark, 11 de diciembre de 2023

[47] Samyak Pandey, "Tokyo explores turning city waste into eco-friendly aviation fuel", S&P Global, 5 de abril de 2024

[48] "Waste to fuel the future", Energy Global, 8 de noviembre de 2023

[49] Angie F. J. Tan et al. Reimagining plastics waste as energy solutions: challenges and opportunities, npj Mater. Sustain. 2024, doi.org/10.1038/s44296-024-00007-x

[50] Jenny Frank et al. Quantifying the comparative value of carbon abatement scenarios over different investment timing scenarios, Fuel Communications, 2021, doi.org/10.1016/j.jfueco.2021.100017

[51] The Offsetting Impact of Expanded Biomass Based Diesel Production on Diesel Prices, WAEES, 29 de abril de 2022

[52] **https://www.cepsa.com/es/prensa/cepsa-construira-una-nueva-planta-de-biocombustibles-en-huelva**

[53] "Repsol suministra ya combustible renovable en 33 estaciones de servicio en España y Portugal y enfila las 50", Europa Press, 12 de noviembre de 2023

[54] **https://www.repsol.com/en/sustainability/sustainability-pillars/environment/circular-economy/our-projects/renewable-fuels-from-waste/index.cshtml**

[55] https://www.biovigoenergy.com/

07

Lanzaderas espaciales

La catapulta hacia la economía sin gravedad

Desde los albores de la carrera espacial a finales de los años 1950 y principios de la década de 1960, el desarrollo de sistemas para escapar de la atmósfera y la gravedad terrestres ha sido uno de los mayores retos de la ingeniería. A lo largo del tiempo, hemos visto evolucionar las lanzaderas desde los rudimentarios cohetes de combustible sólido hasta los sofisticados transbordadores espaciales de la NASA, que marcaron los años 1980 y 1990 gracias a una tecnología que permitía viajes de ida y vuelta al espacio, una solución mucho más sostenible. Sin embargo, con el tiempo, los transbordadores dejaron de ser protagonistas y, en 2011, el *Atlantis* completó su última misión al aterrizar en Cabo Cañaveral en Florida, EEUU. La NASA abandonó este programa de lanzaderas debido, sobre todo, a los altos costes asociados. Esto supuso una vuelta a los cohetes de un solo uso para lanzar objetos al espacio, incluidas naves tripuladas, que viajan al espacio en cápsulas *Soyuz*, desarrolladas por Rusia. Actualmente, la búsqueda de la sostenibilidad y la eficiencia ha llevado a una nueva era de innovación en la industria espacial.

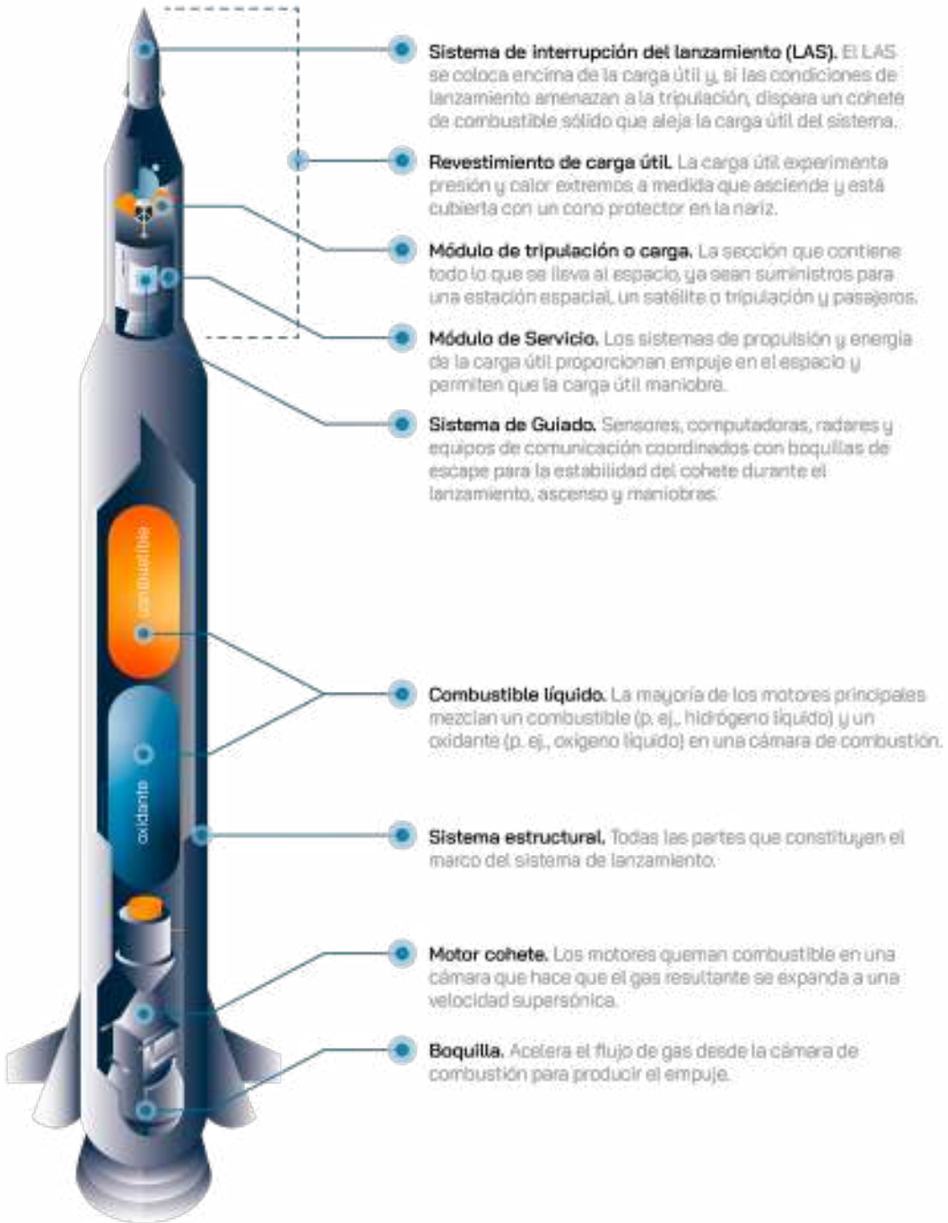
De la exploración, al emprendimiento espacial

POR DENTRO

Los sistemas conocidos comúnmente como "lanzaderas" han sido nuestro billete a cientos de viajes espaciales, que han llevado al ser humano a la Luna, a la creación de estaciones espaciales como la MIR y la Estación Espacial Internacional y han propulsado naves como la Voyager hasta los confines del sistema solar.[1] Ya a finales del siglo XIX, el escritor y profesor ruso Konstantin Tsiolkovsky imaginaba –unos años después del viaje a la Luna descrito por Julio Verne, en el que utilizaba un cañón– la posibilidad de viajar al espacio utilizando un cohete. Sin embargo, los orígenes de las lanzaderas espaciales se remontan a la Guerra Fría, cuando los desarrollos de misiles consiguieron crear cohetes tan potentes que eran capaces de poner objetos y satélites en órbita.[2] En 1957, los investigadores y los ingenieros rusos consiguieron lanzar el Sputnik 1, el primer satélite artificial, adelantándose a los estadounidenses, gracias a un cohete R-7 Semeyorka. La respuesta americana fue la puesta en marcha del programa Apolo porque, en palabras del famoso presidente John F. Kennedy, "eligieron ir a la luna antes de terminar la década [de 1960]".[3] Los cohetes del programa Apolo, conocidos como Saturno, efectivamente consiguieron llevar al ser humano a la Luna, gracias a una impresionante capacidad de carga y una altísima fiabilidad que estableció un nuevo estándar en el lanzamiento de cargas pesadas al espacio. Quizás el desarrollo más interesante entre el programa Apolo y la actualidad, con los cohetes de compañías como SpaceX, es el transbordador espacial, un vehículo de la NASA que ofrecía una nueva forma, reutilizable y más económica, de acceder al espacio. A lo largo de treinta años, los transbordadores espaciales realizaron una amplia variedad de misiones, incluido el despliegue de satélites, el lanzamiento y sucesivas reparaciones del Telescopio Espacial Hubble y, quizás lo más impresionante, la construcción y mantenimiento de la Estación Espacial Internacional. Sin embargo, el programa también tuvo que enfrentarse a distintos desafíos, incluidos dos trágicos accidentes que resultaron en la pérdida de las naves Challenger y Columbia, que ocasionaron la muerte de todos sus tripulantes. Según algunos expertos en ingeniería espacial, los transbordadores se construyeron mal y, además, en un mal momento; era un programa que estaba "destinado al fracaso".[4] Cuando, a principios de la década de 2010, el transbordador espacial Atlantis emprendió sus últimos viajes, empezaron a surgir nuevas ideas para transformar la industria de las lanzaderas espaciales. Una de las grandes promesas consistía en "revolucionar el acceso al espacio" mediante el desarrollo de nuevas lanzaderas espaciales reutilizables. Una de las compañías líderes en este campo es SpaceX, fundada por el multimillonario Elon Musk en 2002. SpaceX fue pionera en introducir el cohete Falcon 9, diseñado desde el principio para ser reutilizable, que ha demostrado la viabilidad y la eficacia de esta tecnología al realizar numerosos aterrizajes exitosos de los distintos fragmentos –conocidos técnicamente como "etapas"– del cohete, algo que podría reducir significativamente los costes de acceso al espacio.[5] Este enfoque no solo reduce los costes, sino que también ha mejorado la sostenibilidad de los viajes espaciales. Al recuperar y reciclar las primeras etapas de sus cohetes, SpaceX –y otras empresas que comparten la misma filosofía– están allanando el camino hacia un futuro en el que el envío de tripulación y materiales al espacio sea más accesible y sostenible que nunca.

Empresas como SpaceX y Blue Origin, así como instituciones públicas como la NASA y la ESA, han iniciado la investigación y las pruebas de nuevas lanzaderas espaciales más eficientes, volviendo a explorar sistemas recuperables que, a la larga, suponen una solución más sostenible.[6] Las lanzaderas espaciales reutilizables, como el Falcon 9 de SpaceX y el New Shepard de Blue Origin, ofrecen varias ventajas significativas frente a las tecnologías tradicionales utilizadas por la NASA, la ESA y otras agencias especiales. Fundamentalmente, estas tecnologías permiten la recuperación y reutilización de sus componentes principales, una vez que se ha lanzado la carga al espacio. Esta capacidad de reutilización reduce drásticamente el coste de los viajes espaciales, dado que elimina la necesidad de construir nuevos cohetes y depósitos de combustible para cada misión.[7] Además, esto reduce la cantidad de basura espacial, dado que normalmente las etapas de los cohetes que parten hacia el espacio simplemente se "sueltan" del resto de la infraestructura y se aventuran en caída libre hacia la atmósfera, o quedan suspendidas en órbita. La reuti-

Estructura de un cohete espacial



Fuente: Space Fundation

lización de los sistemas de lanzaderas también contribuye a incrementar la sostenibilidad de los viajes espaciales, el reciclaje de componentes evita la sobreexplotación de recursos limitados y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la fabricación de los cohetes y otros sistemas.[8]

En este sentido, SpaceX lleva más de dos décadas trabajando en la reducción de costes de las lanzaderas espaciales y la reutilización de cohetes. A pesar de sus muchos éxitos, incluido el lanzamiento y la posterior recuperación del cohete Falcon 9, la empresa ha tenido muy malos momentos, incluidos varios intentos de lanzamiento fallidos en 2006 y 2008 que casi la llevan a la bancarrota. Más recientemente, sus cohetes Starship –diseñados para transportar humanos al espacio, con objetivos a largo plazo como misiones a la Luna y a Marte– sufrieron varias explosiones en las fases de prototipado aunque, al quinto intento, lograron volver a aterrizar sanos y salvos. Este sistema de lanzadera podría reducir los costes de llevar astronautas al espacio hasta casi cien veces, según declaraciones del propio Elon Musk.[9] Estos cohetes están diseñados para que algunas de sus etapas puedan retornar a la Tierra y aterrizar tras el lanzamiento, gracias a unos pequeños propulsores y varias aletas de control que permiten una vuelta controlada hasta una plataforma que puede estar tanto en el mar como en tierra firme.

Las estimaciones de coste calculan que lanzar –y relanzar– un Falcon 9 es hasta un 30% más barato que un cohete desechable equivalente. Además del Falcon 9 y Starship, SpaceX también comercializa el cohete Falcon Heavy, creado especialmente para cargas pesadas y el cohete más potente disponible actualmente, capaz de transportar hasta 64 toneladas de material a la órbita terrestre. A falta de transbordadores, varias agencias espaciales, incluida la NASA utilizan los cohetes diseñados por Musk para mandar a sus astronautas al espacio y para avituallar a la Estación Espacial Internacional.[10]

A la zaga de Elon Musk están otros multimillonarios como Jeff Bezos, el fundador de Amazon, y Richard Branson, el fundador del Grupo Virgin. Bezos fundó Blue Origin, una empresa espacial que está desarrollando un cohete bautizado como New Shepard, diseñado para llevar a los pasajeros en vuelos suborbitales. Como el Falcon 9, este sistema está diseñado para ser reutilizable, gracias a la capacidad de realizar aterrizajes verticales controlados después del lanzamiento. Sin embargo, este cohete apenas alcanza los 100 kilómetros por encima de la superficie, muy lejos de la Estación Espacial (situada a unos 400 kilómetros de altura) y por tanto con una potencia limitada para vuelos espaciales más largos. La

EMMA FERNÁNDEZ

El contexto actual de escasez de materias primas, el cambio climático o el turismo espacial están contribuyendo a una nueva carrera por el espacio a la que ninguna potencia quiere renunciar. El segmento de lanzadores siempre ha gozado de una consideración estratégica especial, al valorarse el acceso al espacio como una competencia a la que no se puede renunciar, y por tanto siempre ha contado con un apoyo institucional fuera de discusión. (...)

cápsula de pasajeros del New Shepard está pensada para el turismo espacial, de momento solo al alcance de unos pocos privilegiados con billetes que alcanzan los 28 millones de dólares,[11] y está diseñada con grandes ventanales que proporcionan una vista impresionante de la Tierra desde el espacio. Blue Origin ha mandado ya una veintena de misiones al espacio suborbital, no sin problemas: en 2022 la Administración de la Aviación de EE.UU. prohibió los vuelos de esta empresa durante quince meses, tras detectar un fallo en el motor de uno de los vehículos.[12] Además del turismo espacial, Blue Origin también está trabajando en el desarrollo de sistemas de lanzamiento más grandes, como el cohete New Glenn que, como los Falcon Heavy, podrá propulsar cargas hacia la órbita terrestre y la Estación Espacial Internacional. Virgin Galactic, fundada por Branson en 2004, está desarrollando otra alternativa para el turismo espacial, la nave VSS Unity. Aunque no está diseñada para llevar cargas a órbita, representa un paso importante en la comercialización de los viajes espaciales, con precios mucho más competitivos que las alternativas de Bezos. Como contraste a menor escala, cabe destacar los esfuerzos de la empresa neozelandesa Rocket Lab, fundada en 2006. Esta empresa, considerada la más pequeña de lanzamientos espaciales, tiene como objetivo principal ofrecer lanzamientos pequeños y medianos de manera rápida y eficiente. La empresa ha implementado novedades como la producción en serie de cohetes y, como SpaceX, consigue recuperar la primera etapa de sus cohetes utilizando un sistema compuesto por una serie de paracaídas y la ayuda de un helicóptero. Además de lanzar cargas comerciales de hasta 300 kilogramos, Rocket Lab ha contribuido a la exploración espacial mediante el lanzamiento de misiones científicas y de investigación, lanzando satélites para la NASA, la ESA y otras agencias espaciales, así como para universidades y empresas de todo el mundo. Son uno de los principales competidores en el lanzamiento de objetos a órbitas bajas, lo que incluye el desarrollo de megaconstelaciones de satélites como Starlink.[13] Las grandes potencias asiáticas también trabajan duro para poder competir con los desarrollos en Europa y EE.UU. En los últimos años, la Agencia Espacial China ha desarrollado las lanzaderas Long March, una familia de cohetes que abarca desde lanzadores ligeros hasta lanzadores pesados, utilizados para una amplia gama de misiones, incluyendo el lanzamiento de satélites, naves espaciales y astronautas. Por otro lado, el programa espacial indio ha logrado desarrollar varias lanzaderas que, entre otras cosas, les han permitido mandar sondas que han llegado a la Luna y Marte. De hecho, los indios son los primeros en haber conseguido detectar agua en la superficie lunar.[14]

La implementación y desarrollo de lanzaderas reutilizables está teniendo un impacto totalmente transformador en la industria espacial. Al reducir el coste del transporte de cargas al espacio, estas tecnologías están abriendo nuevas oportunidades para el lanzamiento de satélites, misiones científicas y viajes espaciales. Varios análisis académicos centrados en el ecodiseño sugieren que, a pesar de la contaminación generada por los lanzamientos y las emisiones de carbono asociadas a la quema de combustibles fósiles, estos dispositivos tienen un impacto medioambiental a largo plazo menor que las alternativas tradicionales, basadas en cohetes de un solo uso. Desde el punto de vista económico, además, presentan –lógicamente– una mayor eficiencia: los lanzadores reutilizables permiten no solo reaprovechar gran parte de los cohetes, sino también realizar lanzamientos más frecuentes y eficientes.[15] Al mismo tiempo, el desarrollo de nuevos sistemas de lanzamiento –reutilizables o no– presenta una serie de desafíos a medio y largo plazo. En primer lugar, el diseño de lanzaderas, especialmente lanzaderas reutilizables, requiere un alto nivel de complejidad tecnológica, lo que aumenta los costes en investigación y desarrollo y, después, en fabricación. De momento, las agencias públicas, incluidas la NASA y la ESA, tienen una enorme desventaja frente a las empresas de los multimillonarios Musk, Bezos y Branson, que cuentan con inversiones impresionantes y décadas de desarrollo por delante. Sería interesante replantear la distribución de fondos públicos para poder colaborar, primero, y competir después con todas estas empresas y evitar dejar el transporte, tanto de astronautas como de mercancías, en manos de entidades exclusivamente privadas. En este sentido, tanto la Comisión Europea como la Agencia Espacial del Reino Unido[16] han prometido grandes inversiones para el desarrollo de tecnologías de lanzamiento propias, que puedan seguir la estela no solo de los cohetes de SpaceX sino también de los sistemas Ariane, un programa de cohetes coordinado entre Airbus y la ESA creado en 1973.[17] Además, la recuperación de los lanzadores reutilizables requiere una logística compleja y especializada, lo que puede suponer un gran desafío tanto para agencias públicas como para empresas privadas. Por último, las regulaciones espaciales y aeroes-

EMMA FERNÁNDEZ

La irrupción de SpaceX ha supuesto una revolución para el segmento de lanzadores espaciales, impulsando una importante reducción de costes de producción y operaciones a la vez que se ha favorecido la competencia en casi todos los segmentos. Algunos segmentos de mercado son cautivos de las grandes potencias, pero en los últimos años, con el crecimiento de los microlanzadores la iniciativa privada está financiando diferentes proyectos para contribuir al lanzamiento de satélites de baja órbita y a la observación de la tierra, entre otras aplicaciones.

paciales deberían adaptarse a estos nuevos sistemas reutilizables, lo que puede generar algunos obstáculos burocráticos y, en última instancia, también operativos. Se requieren nuevos marcos legales y regulatorios para garantizar la seguridad de las operaciones, la protección del medio ambiente y la asignación responsable del espacio aéreo. En cualquier caso, a medida que la tecnología avanza y madura –y mientras aparecen nuevos cohetes y nuevas soluciones en el mercado para recortar los costes todavía más–, podemos esperar un aumento significativo en la actividad espacial en los próximos años.

A largo plazo, las lanzaderas reutilizables podrían acelerar la conquista del espacio, empezando por los nuevos alunizajes previstos en los próximos años por la NASA y la Agencia Espacial China – ambas instituciones esperan poder pisar la Luna antes de 2030.[18] También son fundamentales para mantener y abastecer a la Estación Espacial Internacional y futuras estructuras y estaciones similares, como la estación china Tiangong.[19] Más adelante, seguro que las lanzaderas juegan un papel crucial en los primeros viajes tripulados a Marte y más allá, no solo para el transporte de astronautas sino también para el envío de cargamentos a otros planetas. Estamos un paso más cerca de convertirnos en una civilización interplanetaria, uno de los sueños más recurrentes de lo que hasta ahora se consideraba ciencia ficción.

¿Cómo elegir el proveedor de lanzamiento de cohetes adecuado?

Fuente: FasterCapital

Poner en órbita un satélite, una sonda o una misión tripulada no solo es caro, sino también arriesgado y complejo. Coste, fiabilidad, disponibilidad, flexibilidad y compatibilidad son algunos de los factores a considerar en la elección.

COSTE: El coste de poner una carga útil en órbita depende de varias variables, como la masa, el tamaño, la forma y el destino de la carga útil, el tipo y la configuración del cohete, el sitio de lanzamiento y la trayectoria, y la demanda y la oferta del mercado. Por lo general, cuanto más pesada y grande sea la carga útil, más caro será el lanzamiento. SpaceX cobraba a mediados de 2024 alrededor de 62 millones de dólares por el lanzamiento de un Falcon 9, que puede transportar hasta 22,8 toneladas métricas a la órbita terrestre baja (LEO), pero solo 4,5 toneladas métricas a la órbita de transferencia geoestacionaria (GTO). Algunos proveedores de lanzamientos ofrecen descuentos o incentivos para ciertos clientes, como instituciones educativas, agencias gubernamentales u operadores de satélites pequeños.

Rocket Lab ofrece un servicio de lanzamiento dedicado para satélites pequeños llamado Electron, que cuesta alrededor de 7,5 millones de dólares por lanzamiento y puede transportar hasta 300 kg a LEO.

FIABILIDAD: Indica la probabilidad de entregar con éxito la carga útil a la órbita y condiciones deseadas. Los fallos en el lanzamiento pueden provocar la pérdida de la carga útil, el cohete o incluso vidas humanas. Los proveedores de lanzamientos suelen medir su fiabilidad por el número de lanzamientos exitosos del número total de lanzamientos.

SpaceX tenía a mediados de 2024 una fiabilidad del 97,5% para su cohete Falcon 9, basada en 80 lanzamientos exitosos de 82 intentos hasta marzo de ese año. Algunos proveedores de lanzamientos también ofrecen seguros o compensaciones por fallos de lanzamiento, lo que puede mitigar el impacto financiero de un fallo de lanzamiento.

DISPONIBILIDAD: Se refiere a la frecuencia y puntualidad de las oportunidades de lanzamiento y se ve afectada por la demanda y la oferta de lanzamiento, la capacidad y la ubicación del lugar de lanzamiento, las condiciones meteorológicas y la preparación técnica del cohete y la carga útil. La disponibilidad de lanzamiento es importante para las empresas espaciales que tienen calendarios o plazos ajustados, o que necesitan lanzar múltiples cargas útiles en un corto período de tiempo. Los proveedores de lanzamiento con alta disponibilidad pueden ofrecer más franjas horarias de lanzamiento y retrasos más cortos.

Virgin Orbit tenía a mediados de 2024 una alta disponibilidad para su servicio LauncherOne, que utiliza un avión Boeing 747 modificado para lanzar pequeños satélites desde varios lugares del mundo, según las necesidades y preferencias del cliente.

FLEXIBILIDAD: La capacidad de adaptarse a los requisitos y preferencias específicos del cliente está influenciada por el diseño y el rendimiento del vehículo de lanzamiento, las instalaciones y la infraestructura del sitio de lanzamiento, y las políticas y procedimientos del proveedor de lanzamiento. La flexibilidad de lanzamiento es relevante para las empresas espaciales que tienen cargas útiles únicas o complejas, o que necesitan cambiar o modificar sus planes de lanzamiento debido a circunstancias imprevistas. Los proveedores de lanzamiento con alta flexibilidad pueden ofrecer más opciones de personalización y adaptación para el cliente.

Blue Origin tiene una gran flexibilidad para su cohete New Glenn, que puede lanzar una amplia gama de cargas útiles a varias órbitas, y también se puede reutilizar hasta 25 veces, lo que reduce los costos de lanzamiento y aumenta la disponibilidad de lanzamiento.

COMPATIBILIDAD: El grado de ajuste e integración entre el vehículo de lanzamiento y la carga útil está determinado por las características físicas, eléctricas, mecánicas y ambientales y las interfaces del cohete y la carga útil. La compatibilidad de lanzamiento es esencial para las empresas espaciales que tienen cargas útiles sensibles o sofisticadas, o que necesitan garantizar el rendimiento y la funcionalidad óptimos de sus cargas útiles. Los proveedores de lanzamiento con alta compatibilidad pueden ofrecer más seguridad y verificación para el cliente.

Arianespace tiene una alta compatibilidad para su cohete Ariane 5, que puede lanzar dos cargas útiles simultáneamente, utilizando un sistema adaptador de doble carga útil que garantiza la separación y el despliegue de las cargas útiles sin interferencias ni daños.

3, 2, 1... hacia una nueva cadena de valor desde el lanzamiento

EN ACCIÓN

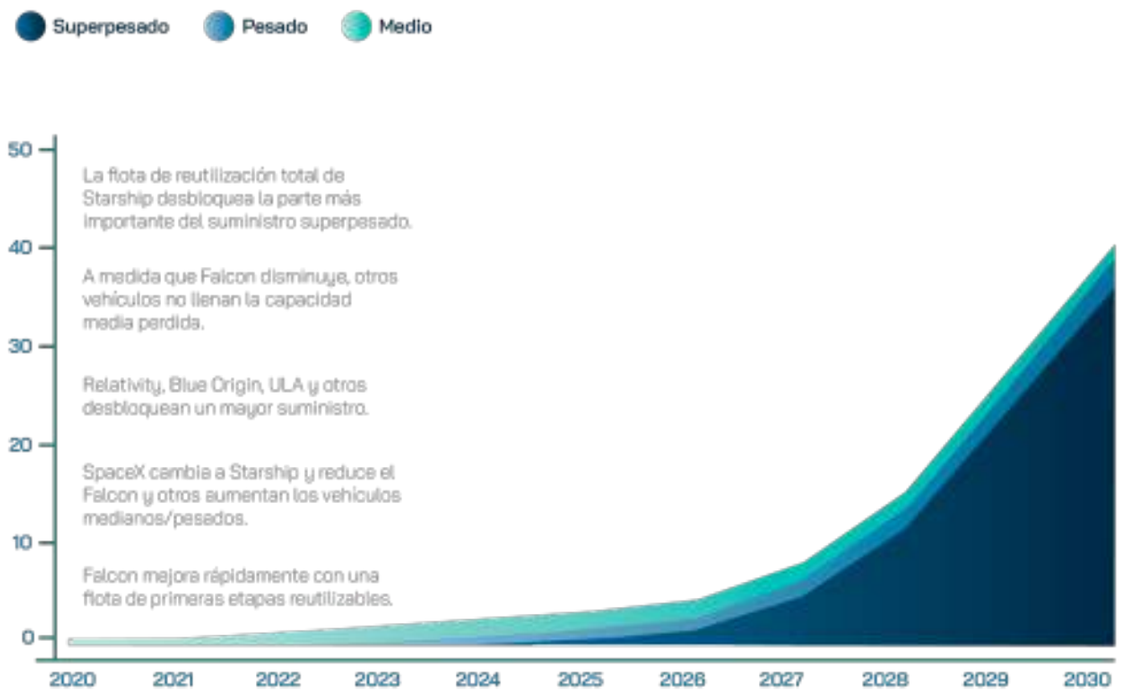
El 58% de los aproximadamente 240.000 millones de dólares invertidos en empresas relacionadas con las etapas iniciales de la salida al espacio, durante los últimos 14 años, se ha destinado a la fase de lanzamiento, aunque representa sólo el 1,5% de los ingresos de esta industria.[20] Pero la carrera de la innovación para construir la nueva economía del espacio se ha dirimido, en buena parte, ahí. Muchas nuevas empresas se han venido centrando en el desarrollo vehículos de lanzamiento que aporten una novedad en el tamaño de la carga útil, la sostenibilidad o la adaptación a los diferentes requisitos orbitales.[21] En este último ámbito se insertan las innovaciones de la startup surcoreana Innospace, que diseña un lanzador de satélites pequeños de tres etapas que transporta una carga útil de 500 kg hasta una órbita heliosincrónica (SSO) de 500 km,[22] y de la británica Stratobooster, cuyo globo eleva los cohetes a una altitud de 32 kilómetros, donde se reduce la cantidad de empuje necesario.

Una de las líneas clave de innovación es la de los vehículos de lanzamiento reutilizables, diseñados para recuperar los propulsores primarios una vez completada la misión. De ese modo, se pueden crear nuevas oportunidades para generar ingresos, como la venta o el arrendamiento de cohetes usados, o la oferta de descuentos e incentivos a los clientes que elijan cohetes reutilizables. Según un informe de Bryce Space and Technology, los cohetes reutilizables podrían reducir el coste de lanzamiento hasta en un 40% en 2030, haciendo que el espacio sea más accesible y asequible para una gama más amplia de clientes.[23] Como alternativa a la reutilización que proponen startups como la alemana POLARIS Raumflugzeuge[24] y la india Starlax Aerospace,[25] destaca la propuesta de la Universidad de Glasgow, que ha probado con éxito un cohete autófago que consume su propio fuselaje como combustible, algo que ha estado en la mente de los ingenieros desde 1938. El plástico derretido se dirige al sistema de combustión del motor, produciendo efectivamente combustible[26] adicional para complementar a su propulsor líquido. Muchos esfuerzos de innovación se dirigen también precisamente a encontrar la mezcla adecuada de combustibles sólidos y líquidos y combustibles verdes. Los motores de la francesa HyPrSpace[27] utilizan un combustible sólido alimentado por oxidante líquido.

La revolución digital es otro de los grandes vectores de transformación de los sistemas de lanzamiento, con iniciativas en el ámbito de la automatización de los sistemas de vuelos espaciales y la integración de la inteligencia artificial (IA). El piloto automático de la startup estadounidense Morpheus Space[28] se integra en los sistemas de propulsión y elimina por completo la necesidad de que los operadores de satélites utilicen hardware y software personalizados para maniobras orbitales. Aevum[29] ha diseñado una red con puertos espaciales basada en IA que sirven de instalaciones de operaciones y entrega de carga útil y Beyond Gravity ha trabajado con RevoAI en un proyecto de la ESA para evaluar el uso de la inteligencia artificial en el desarrollo de estructuras futuras. En el campo de los materiales, el objetivo es producir vehículos espaciales más ligeros, resistentes y económicos. En esa línea se sitúan los escudos térmicos de Canopy Aerospace,[30] que protegen a las naves espaciales durante el reingreso y contienen sensores multimodales para detectar anomalías en cualquier etapa del vuelo. También se está trabajando en el diseño y la organización de la carga útil que transportan los vehículos espaciales, que suele tener diferentes formas y tamaños. Arianespace tiene una alta compatibilidad para su cohete *Ariane 5*, que puede lanzar dos cargas útiles simultáneamente, utilizando un sistema adaptador que garantiza la separación sin interferencias ni daños.

El desarrollo de cohetes más pequeños permite un acceso más rápido y personalizado al espacio, abriendo el mercado a una gama más amplia de proveedores.[31] El proyecto RRTB, financiado con fondos europeos y dirigido por la española Pangea, confía en tener un motor listo para volar en 2025 y demostrar así que el uso de pequeños cohetes que puedan transportar hasta 500 kilogramos de carga puede ser rentable. La dificultad tecnológica estriba en el impacto que sufren al reingresar a la atmósfera de la Tierra, en el camino de vuelta, antes de aterrizar de manera segura. En el marco del proyecto PRIME, financiado también con fondos europeos, Orbex ha presentado un prototipo de cohete de 19 metros de largo, el primer microlanzador completamente orbital de Europa para satélites pequeños. Está

Evolución de la capacidad de suministro de lanzamiento



Fuente: McKinsey & Company

diseñado para reducir las emisiones de carbono hasta en un 96% y pesa un 30% menos que los lanzadores tradicionales. A favor de esta tendencia juegan los desarrollos tecnológicos dirigidos a crear satélites pequeños, los cubeSats y nanoSats, que pueden realizar ya diversas funciones, como comunicaciones, teledetección e investigación científica, a una fracción del coste de los tradicionales. Los 2.860 SmallSats, de 267 operadores diferentes, representaron alrededor del 97% de las naves espaciales lanzadas en 2023[32] y el 63% de la carga, pero sólo el 5% se embarcaron en vehículos pequeños o microvehículos, dos puntos menos que el año anterior.

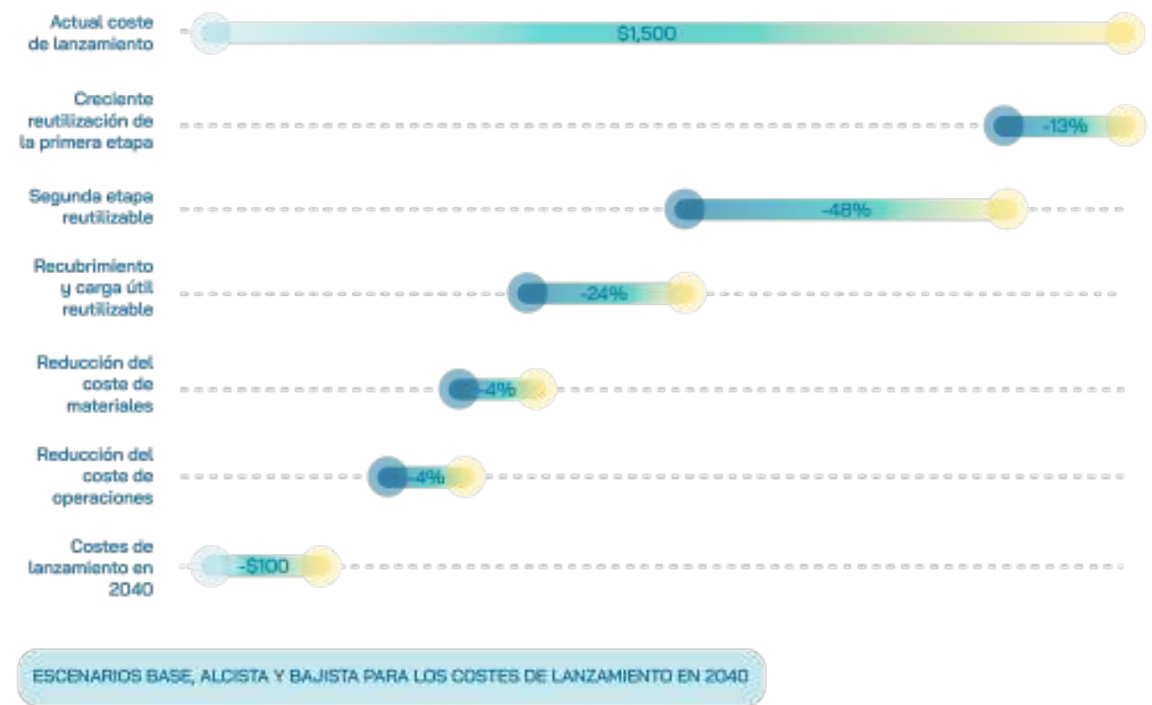
La confluencia de tecnologías en la vanguardia de la era digital ha sido inmediata en el ámbito de los lanzadores espaciales. El cohete *Relativity Space Terran 1* de Relativity Space es el primero fabricado íntegramente con piezas impresas en 3D, una innovadora aleación de cobre, cromo y niobio capaz de soportar temperaturas cercanas a los 3.315º C,[33] hasta un 40% más altas que las aleaciones de cobre tradicionales, lo que conduce a componentes de mayor rendimiento y reutilización. Conforme todas estas innovaciones van reduciendo el coste de lanzamiento al espacio de cargas útiles, se reduce la barrera de entrada de nuevos clientes, lo que retroalimenta el desarrollo del sector y está propiciando opciones de vuelo más frecuentes y flexibles.[34] Euroconsult estimaba en diciembre de 2023 el mercado mundial de lanzamientos en 12.600 millones de dólares, sobre un volumen de negocio total de la economía espacial de 462.000 millones.[35]

El cambio de paradigma puede venir de la mano del proyecto de cohete *Starship* de SpaceX, un vehículo de lanzamiento súper pesado totalmente reutilizable que podrá transportar hasta 150 toneladas de carga útil a la órbita terrestre baja y, posteriormente, a la Luna y Marte. Si se lanzara un *Starship* tres veces a la semana, sería capaz de poner en órbita más masa en un año que la enviada por la humanidad al espacio en toda la historia. Habrá que seguir de cerca también los pasos de China, que ha establecido una agenda ambiciosa para transformarse en la potencia espacial líder mundial en 2045. Para ello ha previsto dominar la innovación independiente y está promoviendo la transmisión de tecnología de defensa del sector militar al comercial (y viceversa). El proyecto Larga Marcha 9 (CZ-9) contempla la creación de un cohete súper pesado chino que entrará en funcionamiento en 2030 y será capaz de elevar 140 toneladas de carga a LEO, coincidiendo con el Sistema de Lanzamiento Espacial de la NASA.[36] Estos movimientos llevan a hablar del paso de una era de restricción masiva a una era de abundancia masiva.[37] En un extremo, cohetes gigantes capaces de impulsar las economías de escala hasta límites desconocidos; en el otro, propuestas como la Virgin Galactic con *LauncherOne*, un cohete lanzado desde el aire que puede desplegar pequeños satélites desde un avión Boeing 747 modificado.

Persisten, no obstante, desafíos que pueden condicionar el ritmo de desarrollo de la industria de lanzamientos espaciales. El marco regulatorio y la gobernanza aún están en evolución y son inciertos; el impacto ambiental y la sostenibilidad de las operaciones espaciales, especialmente por el problema de los desechos, podrían empujar a los países a tomar medidas restrictivas; y, en tercer lugar, los activos y las actividades espaciales son vulnerables a peligros naturales, como erupciones solares y micrometeoroides, así como a amenazas humanas, como ciberataques, interferencias y armas antisatélite. Algunos expertos esperan que haya entre 60.000 y 100.000 satélites en órbita en 2030. En clave de competencia global, la posición de Europa en el ámbito de los lanzamientos podría ser más ambiciosa. De los 221 vuelos orbitales de 2023, sólo tres correspondían a entidades europeas, muy lejos de los 114 de Estados Unidos, los 67 de China y los 19 de Rusia, hasta de los 7 de India. Un porcentaje muy significativo del total de lanzamientos se realizó con naves comerciales (116), frente a las operadas por gobiernos (84) o las encargadas por Gobiernos a empresas (21).[38] En el marco de su política espacial revisada, que enfatiza la necesidad de investigación y desarrollo de cohetes de próxima generación tras la introducción del nuevo H3,[39] la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) ha iniciado la investigación de un cohete de nueva generación que incorpora la reutilización en la primera etapa en asociación con MHI.[40]

La innovación tecnológica ha propiciado que hoy compitan en el mercado tres tipos de actores. En primer lugar, los proveedores de lanzamiento tradicionales, como United Launch Alliance (ULA), Arianespace, International Launch Services (ILS) y Mitsubishi Heavy Industries (MHI), que siguen siendo referencia para clientes de alto valor, como los operadores de satélites gubernamentales y militares. Junto a ellos, se encuentran los proveedores de lanzamiento del llamado NewSpace, empresas emergentes que están transformando el mercado con cohetes innovadores y reutilizables, como SpaceX, Rocket Lab y Relativity Space, que suelen dirigirse a clientes de bajo coste, como operado-

Impulsores de la previsión de costes de lanzamiento para 2040 en $/kg



Fuente: Citi

EMMA FERNÁNDEZ

España es el cuarto país de la UE en inversión espacial, aunque alejado de Italia, Alemania y Francia. Nuestra industria espacial es joven, pero ha demostrado conocimiento y capacidad de innovación tanto por su participación en numerosos proyectos de la ESA como por contar con un proyecto de microlanzadores como PLD Space. La tecnología espacial es una apuesta de medio plazo y las iniciativas europeas son relevantes. España debe sumarse a las mismas con decisión y comprometiendo financiación a medio y largo plazo. Solo así podremos atraer la inversión privada necesaria para acometer las fuertes inversiones necesarias para mejorar la posición actual.

res comerciales y de satélites pequeños, pero también están asumiendo misiones de carga y de transporte de tripulación de la NASA a la Estación Espacial Internacional (ISS). Y, en tercer lugar, los pequeños proveedores de lanzamiento, empresas de nicho especializadas en satélites pequeños, que tienen como clientes a instituciones académicas y de investigación, como Firefly Aerospace, Virgin Orbit y Astra.

Para competir, hay estrategias de diferenciación propias de la economía del espacio. Como la fiabilidad, un factor clave para los clientes con cargas útiles de alto valor o urgentes, como satélites de seguridad nacional y las misiones de vuelos espaciales tripulados. Las tasas de éxito de las empresas de referencia se movían en torno al 95- 97% a principios de 2024. Otra vía para aportar valor es demostrar flexibilidad, ofreciendo múltiples opciones en términos de vehículo de lanzamiento, ubicación, frecuencia, órbita y precio. El plazo para que las empresas lancen un satélite también se reducirá de años a semanas mediante la integración vertical con las instalaciones de lanzamiento privadas. Rocket Lab ya ha obtenido una fuerte demanda comercial con compromisos para sus primeros 30 lanzamientos.[41]

También se abre la puerta a líneas de negocio complementarias, como la de Relativity Space, que pretende ofrecer su impresión 3D para permitir la fabricación bajo demanda y en órbita de naves espaciales y hábitats. La fabricación en el espacio se aprovecharía de las condiciones únicas para la producción industrial que proporciona el vacío y la microgravedad, para producir materiales y estructuras que serían difíciles o imposibles de producir en la Tierra. Existe interés en fabricar semiconductores en el espacio para mejorar potencialmente el proceso y posiblemente reducir el consumo de energía en un 60%.[42] Se prevé que una parte significativa del crecimiento de la economía espacial provenga de la demanda de utilizar el espacio para lograr ganancias de productividad en las industrias tradicionales[43] y que cinco sectores (cadena de suministro y transporte; alimentación y bebidas; defensa estatal; comercio minorista, consumo y estilo de vida; y comunicaciones digitales) generen el 60% de la economía espacial mundial en 2035. Junto a ello, a causa de la inestabilidad geopolítica, crece el interés por la garantía de seguridad, conectada con la visión de la defensa espacial, ante el despliegue por parte de países como Estados Unidos, China, Rusia e India de satélites militares y de inteligencia, así como armas antisatélite, para mejorar sus capacidades de disuasión.

En cuanto al coste de poner en órbita una carga útil depende de distintas variables, como la masa, el tamaño, la forma y el destino de dicha carga, así como el tipo y la configuración del cohete, el lugar y la trayectoria de lanzamiento. El precio de los lanzamientos pesados a LEO ha caído de 65.000 dólares por kilogramo a 1.500 dólares por kilogramo, una disminución de más del 95%.[44] En el primer trimestre de 2024, SpaceX cobraba alrededor de 62 millones de dólares por el lanzamiento del Falcon 9, que podía transportar hasta 22,8 toneladas métricas a LEO, pero sólo 4,5 a la órbita de transferencia geoestacionaria (GTO).[45] Rocket Lab ofrecía un servicio de lanzamiento dedicado para satélites pequeños llamado *Electron*, con un coste de alrededor de 7,5 millones de dólares por lanzamiento y podía transportar hasta 300 kg a LEO, y preveía en el futuro situarse por debajo de los cinco millones.

Por lo que se refiere a la situación del mercado, a corto plazo algunas estimaciones apuntan a un escenario probable de déficit de capacidad, de hasta 11.700 toneladas (equivalente a aproximadamente 300 vehículos pesados u 800 medianos) hasta 2025, debido a factores como la saturación de las reservas o al desfase histórico entre el primer vuelo y la tasa máxima de lanzamiento de un nuevo modelo, en un momento en el que se espera la aparición de vehículos desarrollados a lo largo de los últimos años. Sin embargo, a largo plazo, el riesgo sería el contrario, el de un exceso de oferta si finalmente SpaceX decide programar un lanzamiento diario de su Starship.[46] En el conjunto de la economía espacial, según los datos de Euroconsult, el dominio tecnológico de Estados Unidos (150.000 millones de dólares de negocio en 2023) lo distancia de los países asiáticos (112.000 millones) y, sobre todo, de Europa (97.000 millones). McKinsey y el World Economic Forum calculan que la economía espacial mundial tendrá un valor de 1,8 billones de dólares en 2035 (revisable probablemente hasta los 2,3 billones), frente a 630.000 millones de dólares en 2023. En ese cálculo, se incluyen tanto las aplicaciones 'troncales' (satélites, lanzadores y servicios como la televisión por radiodifusión o GPS) como lo que denominan aplicaciones 'de alcance', aquellas para las cuales la tecnología espacial ayuda a empresas de todos los sectores a generar ingresos.[47] De ser así, habrá experimentado una tasa de crecimiento anual que duplicará a la del PIB y se situará al nivel del mercado de semiconductores. En el caso de

los lanzamientos, serán más frecuentes inicialmente, con una media de 210 lanzamientos anuales entre 2023 y 2030, y 160 lanzamientos anuales entre 2031 y 2035, por la irrupción de los lanzadores súper pesados.

Ante esta dinámica general, la Agencia Espacial Europea (ESA) anunció en mayo de 2023 la Iniciativa de Transporte de Carga Comercial (CCTI), una llamada a que las empresas europeas desarrollen sistemas de transporte de carga comercialmente sólidos, especialmente cohetes baratos y reutilizables propios. Una iniciativa similar al programa COTS (Commercial Orbital Transportation Services) de la NASA, que distribuyó 821 millones de dólares a dos empresas (SpaceX y Orbital) y ayudó a crear el Falcon 9. El ciclo de vida del Ariane 5, de la empresa francoalemana Arianespace, está llegando a su fin y el Ariane 6 podría retrasarse a 2025; al tiempo que el conflicto de Ucrania paralizó los lanzamientos de Soyuz desde la Guayana Francesa, de modo que la cuestión se ha vuelto estratégica para la Unión Europea.[48] La política de financiación para desarrollar los nuevos vehículos debe ser lo suficientemente sólida como para impulsar a las empresas europeas a la vanguardia del sector del Nuevo Espacio. Sobre todo, teniendo en cuenta las dudas que todavía plantea el sector entre los inversores privados: en 2022, éstos sólo aportaron 1.000 millones de euros a las empresas tecnológicas, lo que lo convierte en un mercado pequeño en comparación con el de Estados Unidos y el de China, donde captaron seis veces más.[49] Aparte de inversores de capital riesgo especializados, como Thiel's Founders Fund, Seraphim y NewSpace, son los inversores estratégicos, como Airbus, In-Q-Tel y Lockheed Martin, los que dominan la inversión en tecnología espacial. De hecho, casi dos tercios de la inversión provinieron de empresas no aeroespaciales y de defensa.[50]

Los potenciales proveedores de transporte europeos tendrán que competir con empresas que no sólo diseñaron las estaciones espaciales, sino que también han desarrollado la capacidad de transportar carga de forma independiente. Un problema clave en Europa es que la ESA nunca ha podido reunir recursos comparables a los de instituciones homólogas. Su presupuesto en 2022 fue de 7.150 millones de euros, frente a los 22.860 millones de euros de la NASA, algo propiciado probablemente por el hecho de que en su negociación participa un consejo ministerial de 22 representantes de los países miembro.

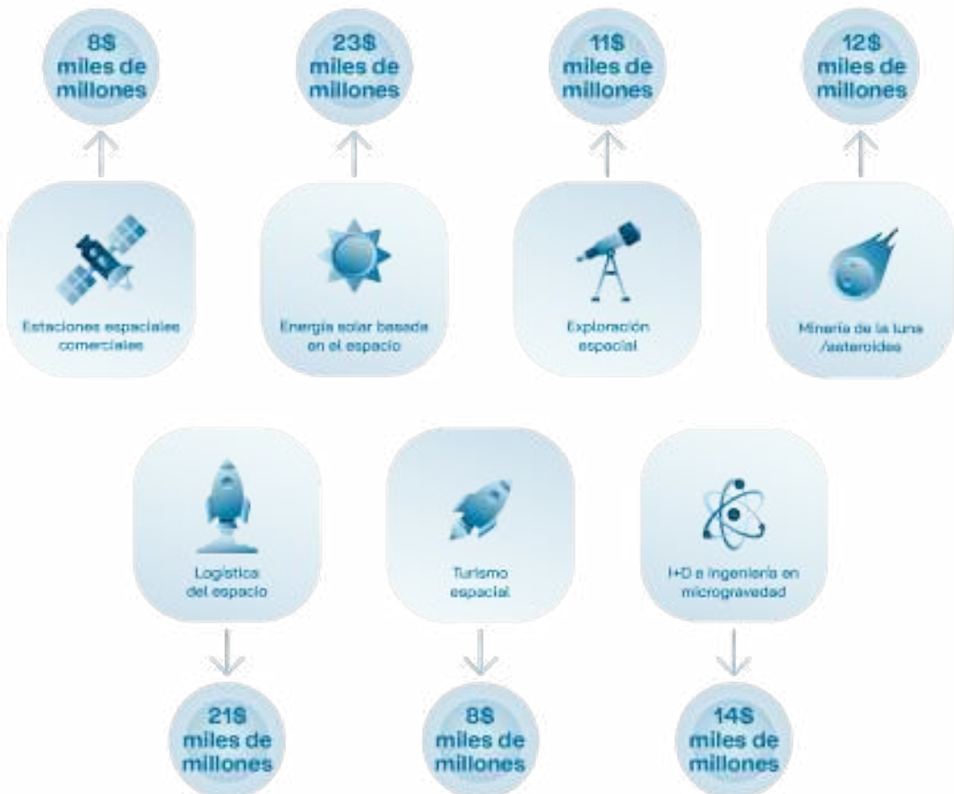
Hacia el MIURA 5 con escala en el Ariane 6

ESPAÑA

La madrugada del 7 de octubre de 2023 la empresa española PLD Space[51] hizo historia a completar con éxito el primer lanzamiento de un cohete europeo privado, el MIURA 1, desde las instalaciones del Centro de Experimentación de El Arenosillo (CEDEA), perteneciente al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). El vuelo tuvo una duración de 306 segundos y MIURA 1 alcanzó un apogeo de 46 kilómetros de altura antes de amerizar en el océano Atlántico. El siguiente paso de la compañía ilicitana será realizar el primer lanzamiento de MIURA 5 a finales de 2025 e iniciar la actividad comercial en 2026 con el objetivo final de superar los 30 lanzamientos anuales a partir de 2030. A las dificultades técnicas asociadas al desarrollo del lanzador, su equipo de innovación ha añadido otros desafíos como los que plantea el contrato Boost! firmado con la Agencia Espacial Europea (ESA) para diseñar un sistema de alojamiento de cargas útiles en el MIURA 5 que aporte mayor flexibilidad a sus clientes, en colaboración con la también española OCCAM Space. MIURA 5 será un lanzador orbital de dos etapas dedicado a pequeños satélites y podrá proporcionar misiones dedicadas y opciones de vuelo compartido. Estará programado para ofrecer un servicio altamente flexible con 30 misiones al año desde diferentes puertos espaciales, incluido el histórico Centro Espacial de Guayana, donde La ESA ha autorizado a España a contar con su propio lanzador de satélites, lo que facilitará las operaciones de PLD Space.

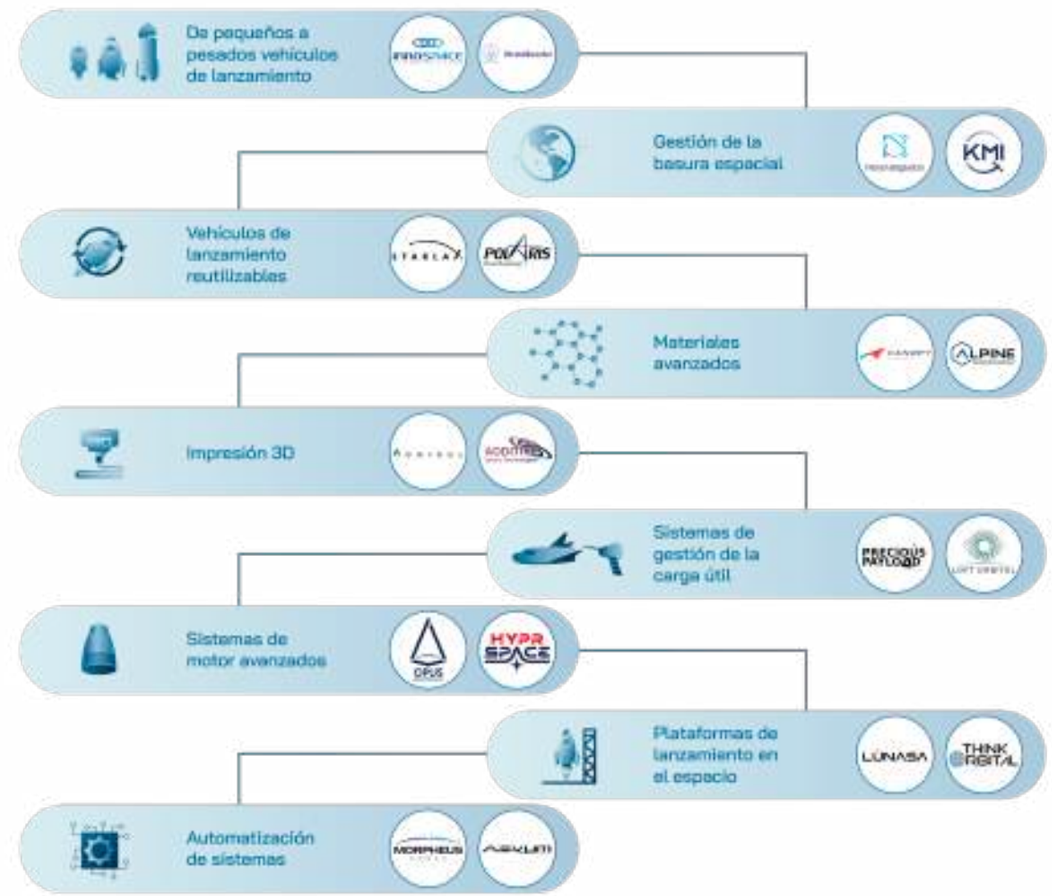
El dinamismo y la capacidad de España para situarse en la vanguardia de un sector tan exclusivo como el de los lanzadores pone de manifiesto las posibilidades de nuestro país en el previsible boom de la economía espacial. En abril de 2023, nació la Agencia Espacial Española, un organismo que unifica todas las políticas espaciales y coordina todos los servicios y actividades en el sector para garantizar la acción estratégica en el ámbito del espacio. En materia de lanzadores, más allá de PLD Space, se han desplegado propuestas innovadoras como el proyecto RRTB, dirigido por la española Pangea y financiado con fondos europeos. Estaba dirigido a investigar formas rentables de lanzar al espacio pequeños cohetes capaces de transportar hasta 500 kilogramos de carga, con la intención de que pudieran estar listos para volar en 2025. El reto era minimizar el impacto que sufren al reingresar a la atmósfera de la Tierra estos microlanzadores. En el ámbito institucional, la participación de nuestro país en proyectos de lanzadores ha sido constante. España ha aportado una inversión de más de 228 millones de euros[52] al desarrollo del nuevo cohete europeo Ariane 6, lanzado al espacio en julio de 2024 desde el Puerto Espacial Europeo de Guayana en su vuelo inaugural. El software del cohete ha sido desarrollado por la barcelonesa GTD, en colaboración con la empresa ArianeGroup, controla el encendido y apagado de los diferentes motores, la separación de componentes, las correcciones de trayectoria y la inserción orbital de los satélites.[53]

Crecimiento previsto de los nuevos sectores de la economía del espacio



Fuente: Citi

Tendencias en Sistemas de Lanzamiento



Fuente: StartUs Insights

Relación de notas

[1] Elizabeth Howell. "**Voyager 1: Facts about Earth's farthest spacecraft**". Space.com. Publicado el 23/08/2022, consultado el 01/05/2024.

[2] Tom Benson. "**Brief History of Rockets**". NASA. Publicado el 13/05/2021, consultado el 01/05/2024.

[3] Marina Koren. "**What John F. Kennedy's Moon Speech Means 50 Years Later**". The Atlantic. Publicado el 15/07/2019, consultado el 01/05/2024.

[4] MH Hersch. "**Dark Star: A New History of the Space Shuttle**". MIT Press, ed. 2023 DOI: 10.7551/mitpress/13589.001.0001

[5] "**SpaceX hails 'revolution' after recycled rocket launch, landing**". Phys.org. Publicado el 31/03/2017, consultado el 01/05/2024.

[6] Francisco Doménech y José A. Álvarez. "**Los cohetes más potentes de la historia aceleran la carrera hacia la Luna**". El País. Publicado el 26/03/2023, consultado el 01/05/2024.

[7] Angelo Young. "**SpaceX's sustainable space travel: Recycled rockets are green — and they slash launch costs, too**". Salon. Publicado el 22/03/2017, consultado el 01/05/2024.

[8] "**Reducing the Cost of Space Travel with Reusable Launch Vehicles**". NSTXL. Publicado el 12/02/2024, consultado el 01/05/2024.

[9] Grace Kay y Morgan McFall-Johnsen. "**14 big moments in the history of Elon Musk's SpaceX**". Business Insider. Publicado el 23/04/2023, consultado el 01/05/2024.

[10] NASA (2024). "**NASA's SpaceX Crew-8 Launches to International Space Station**". Consultado el 01/05/2024.

[11] Blue Origin (2021). "**The very first seat on New Shepard sells for $28 million**". Consultado el 01/05/2024.

[12] Joey Roulette. "**Blue Origin launches first New Shepard flight since grounding**". Reuters. Publicado el 19/12/2023, consultado el 01/05/2024.

[13] Ashlee Vance. "**How a Dishwasher Engineer Challenged Elon Musk's Grip on Commercial Space**". Bloomberg. Publicado el 04/05/2023, consultado el 01/05/2024.

[14] Helen Pidd. "**India's first lunar mission finds water on moon**". The Guardian. Publicado el 24/09/2009, consultado el 01/05/2024.

[15] GJ Domínguez-Calabuig et al. **9th EUCASS, 2022**. Consultado el 01/05/2024.

[16] UK Goverment (2023). "**UK Space Agency funding boosts plans for launch from SaxaVord Spaceport and Sutherland Spaceport**". UK Space Agency. Publicado el 13/12/2023, consultado el 01/05/2024.

[17] Aurélie Pugnet. "**Europeans called to develop reusable spaceships, amid space access crisis**". Euractiv. Publicado el 08/11/2023, consultado el 01/05/2024.

[18] Harriet Marsden. "**Race to the Moon: the manned missions to lunar surface**". The Week UK. Publicado el 16/01/2024, consultado el 01/05/2024.

[19] Wanyuan Song y Jana Tauschinski. **"China space station: What is the Tiangong?"** BBC News. Publicado el 26/07/2022, consultado el 01/05/2024.

[20] James Mawson, "**Space power shifts from defence to commercial sector**", Global Corporate Venturing, 14 de septiembre de 2023, consultado el 24/04/02024.

[21] **9 Launch System Trends in 2023**, StartUS Insights.

[22] **Innospace.com**

[23] System study results for SABRE-powered reusable launcher, ESA, 14 de diciembre de 2020.

[24] **polaris-raumflugzeuge.de/**

[25] **starlax.co/genesis.html**

[26] **Revolutionary rocket eats for the stars, gov.uk**, 20 de marzo de 2024, consultado el 26/04/2024.

[27] **hypr-space.com/technology/**

[28] **morpheus-space.com/products/direct/**

[29] **aevumspace.com/toSpace**

[30] **https://canopyaerospace.com/**

[31] Gareth Willmer, "**In booming satellite market, micro-rockets are the next big thing**", Horizon, 10 de abril de 2023.

[32] **Smallsats by the Numbers 2024**, BryceTech, marzo de 2024.

[33] **3D Printed Rocket Launched Using Innovative NASA Alloy**, NASA, 02/05/2023.

[34] Startups in Space: **How Rocket Launch Providers Fuel Innovation, Faster Capital**, 16 de marzo de 2024, consultado el 25/04/2024.

[35] **Space Economy Report 2023**, Euroconsult, diciembre de 2023.

[36] **How is China Advancing its Space Launch Capabilities?**, China Power, consultado el 27/04/2024.

[37] Daniel Correa, "**Watch This Space: Looking At The Next Generation Of Space Launch Technology**", Federation of American Scientists, 21 de septiembre de 2023, consultado el 27/04/2024.

[38] **2023 Orbital Launches**, BryceTech, marzo de 2024.

[39] **About H3 Launch Vehicle**, Japan Aerospace Exploration Agency.

[40] "**Japan's quest for the ambitious reusable next-gen rocket**", openaccessgovernment.com, 05/10/2023.

[41] **Rocket Lab USA Poised to Change the Space Industry**, Rocket Lab.

[42] John Coykendall et al. "**Riding the exponential growth in space**", Deloitte Insights, 22 de marzo de 2023, consultado el 26/04/2024.

[43] James Mawson, "**Space power shifts from defence to commercial sector**", Global Corporate Venturing, 14 de septiembre de 2023, consultado el 24/04/02024.

[44] Chris Daehnick, John Gang, Ilan Rozenkopf, "**Space launch: Are we heading for oversupply or a shortfall?**", McKinsey, 17 de abril de 2023, consultado el 27/04/2024.

[45] The Business of Rocket Launch Services: **A Guide for Entrepreneurs**, Faster Capital, 4 de marzo de 2024, consultado el 27/04/2024.

[46] Ryan Brukardt, **How will the space economy change the world?**, McKinsey Quaterly, 28 de noviembre de 2022.

[47] "**Space: The $1.8 trillion opportunity for global economic growth**", McKinsey / World Economic Forum, abril de 2024, consultado el 27/04/2024.

[48] Francesco Nicoli, Kamil Sekut, Giuseppe Porcaro, "**Can Europe make its space launch industry competitive?**", Bruegel, 05/07/2023, consultado el 27 de abril de 2024.

[49] **Space Venture Europe 2022, European Space Policy Institute**, mayo de 2023, consultado el 27/04/2024.

[50] **Expanding Frontiers**, PwC Strategy / UK Space Agency, mayo de 2023, consultado el 27/04/2024

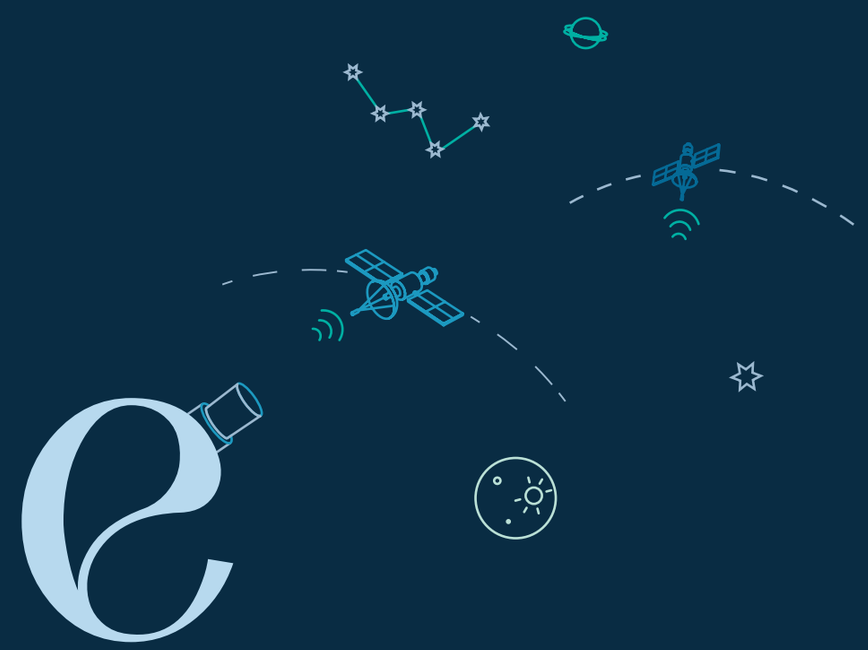
[51] **https://pldspace.com/es/**

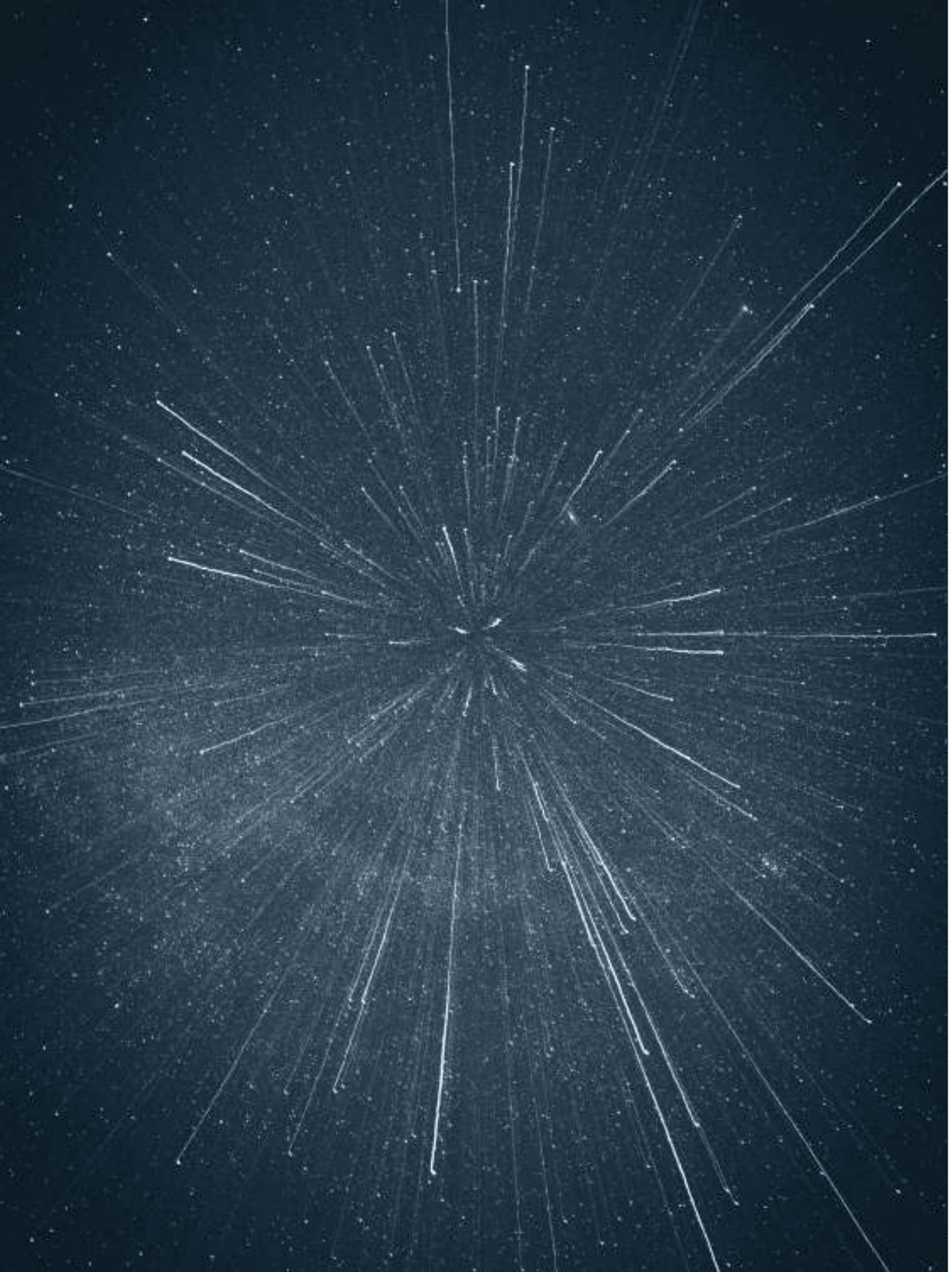
[52] **https://www.lamoncloa.gob.es/lang/en/gobierno/news/Paginas/2024/20240710-eu-rocket-ariane6.aspx**

[53] Josep Corbella, "**El cohete Ariane 6 está controlado por un software de la empresa barcelonesa GTD**", La Vanguardia, 11 de julio de 2024

08

Bajo la cúpula de las megaconstelaciones





Bajo la cúpula de las megaconstelaciones

Desde los orígenes del sistema solar, hace miles de millones de años, hasta hace apenas unas décadas, nuestro planeta, la Tierra, ha tenido solamente un satélite orbitando alrededor: la Luna. Sin embargo, desde octubre de 1957, cuando la antigua Unión Soviética lanzó al espacio el Sputnik en plena Guerra Fría,[1] la órbita terrestre no ha parado de llenarse de satélites artificiales. Estos dispositivos, que tienen como objetivo principal detectar y transmitir señales desde el espacio, han encontrado muchas aplicaciones diferentes, como la observación y el estudio de la Tierra, las telecomunicaciones, la ayuda a la navegación y la investigación científica. Actualmente, los satélites artificiales se han convertido en una herramienta imprescindible para el día a día. Y, ahora, investigadores y empresas quieren llevarlos un paso más allá, creando las llamadas "megaconstelaciones", instalaciones de varios satélites que orbitan la tierra de forma coordinada, en formaciones específicas, operando en conjunto para proporcionar servicios. Las megaconstelaciones de satélites son una de las innovaciones más recientes y disruptivas en la industria espacial y de las telecomunicaciones.[2] En los últimos años, la popularidad de estas estructuras espaciales se ha disparado, debido en gran medida a su capacidad para ofrecer conectividad global de alta velocidad, especialmente en áreas remotas donde la infraestructura de telecomunicaciones tradicional es limitada.

Reducir la brecha digital desde el espacio

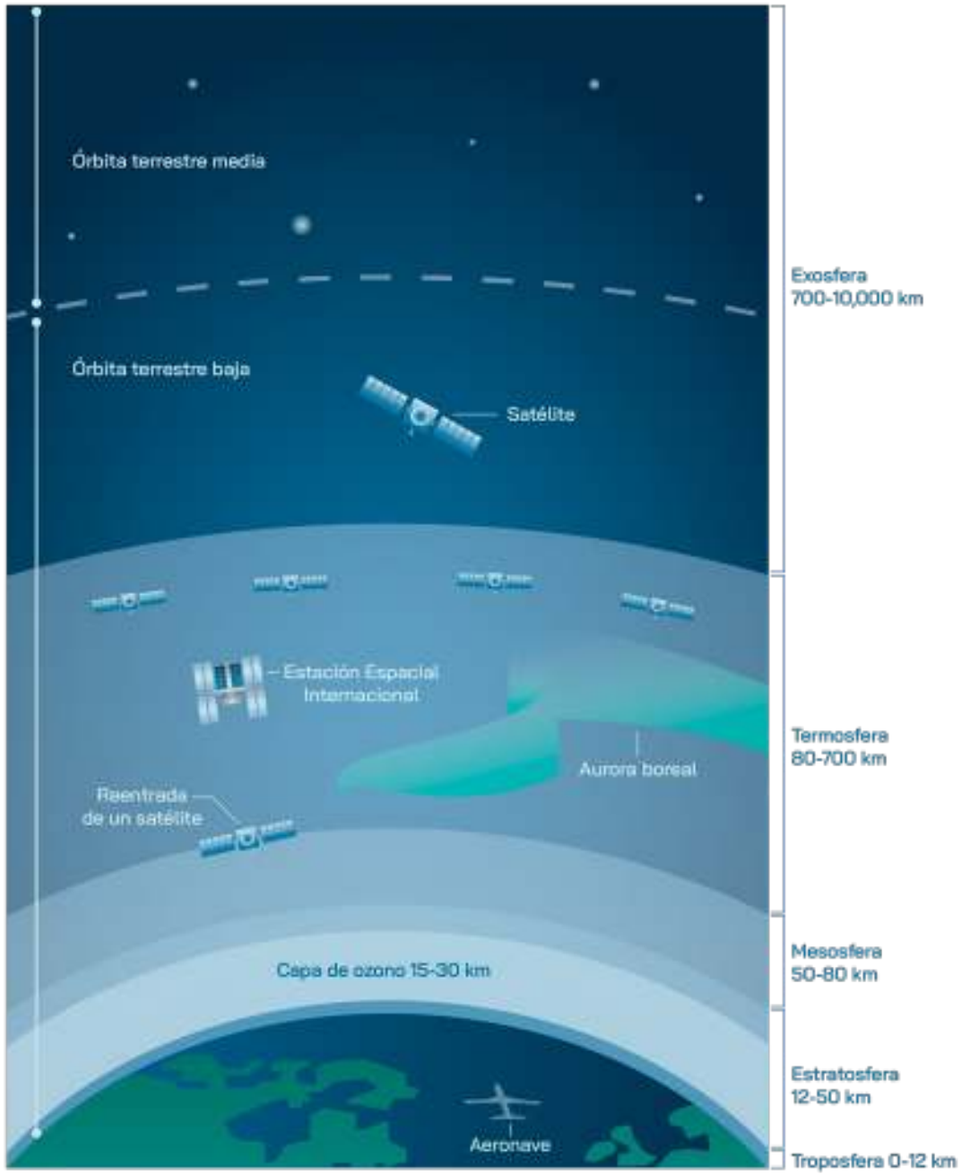
POR DENTRO

Probablemente, uno de los primeros ejemplos de constelaciones coordinadas de satélites es un sistema que, actualmente, utilizamos de forma prácticamente diaria, cada vez que buscamos cómo llegar a nuestro destino usando aplicaciones como Google Maps. El GPS, un sistema que se ha convertido en un estándar de la navegación, tiene su origen en un experimento militar que inició el Departamento de Defensa de los EEUU en la década de 1960. En la época de la Guerra Fría, el objetivo de la red de satélites GPS –las siglas en inglés de "sistema de posicionamiento global"– era detectar, localizar y monitorizar la posición de los submarinos de la marina, pero más adelante los desarrollos y ampliaciones del sistema consiguieron transformarlo en un producto mucho más interesante. El experimento culminó en 1993, con una constelación de 24 satélites sincronizados que permitían posicionar y localizar objetos de manera rápida y precisa.[3] Los rusos crearon un sistema de satélites muy similar, conocido como GLONASS. Pocos años después, la Agencia Espacial Europea (ESA) inició el desarrollo de su sistema de navegación independiente –pero, aun así, compatible–, conocido como Galileo, que ofrece mayor precisión y fiabilidad, gracias a su tecnología de relojes atómicos y un mayor número de satélites en órbita.[4]

Las megaconstelaciones de satélites son una evolución, una versión revisada y mejorada de estos sistemas conectados. A diferencia de los sistemas tradicionales, que constan de, como mucho, unas decenas de satélites grandes y costosos, las megaconstelaciones están compuestas por cientos, incluso miles de satélites más pequeños y más económicos.[5] Además, estos satélites suelen estar diseñados para operar en órbitas terrestres más bajas, lo que les permite ofrecer menor latencia y mayor velocidad de transmisión de datos, en comparación con los satélites tradicionales. Uno de los ejemplos más conocidos de megaconstelaciones de satélites es Starlink, un proyecto desarrollado por SpaceX, la compañía aeroespacial del polémico magnate multimillonario Elon Musk. Starlink tiene como objetivo desplegar una red global de unos 42.000 satélites para proporcionar acceso a internet de alta velocidad en todo el mundo. Aunque de momento solo han lanzado unos 5.800 satélites, de lograr sus objetivos Starlink podría convertirse en una de las megaconstelaciones más grandes jamás creadas.[6] Otro ejemplo destacado es OneWeb, una empresa británica que también está construyendo una megaconstelación de satélites para proporcionar acceso a internet en todo el planeta. Sin embargo, OneWeb plantea una red más modesta, con apenas 648 satélites en órbitas bajas. Todos estos satélites artificiales operan en conjunto para formar una red, una especie de malla gigante que cubre el planeta. De este modo, cuando un usuario necesita conectarse a internet, su dispositivo simplemente se conecta al satélite más cercano, enviando y recibiendo los datos a través de señales de radio que viajan rebotando por la red, entre varios satélites, hasta llegar a su destino final.

Estas megaconstelaciones tienen numerosas ventajas, gracias sobre todo a la posibilidad de proporcionar conectividad a las áreas más remotas del planeta. Se espera que un acceso universal a internet pueda reducir la brecha digital, algo que permitiría al mismo tiempo reducir las desigualdades y mejorar las oportunidades en zonas menos desarrolladas, gracias a un acceso más justo a recursos educativos y recursos relacionados con la salud. Indirectamente, estas mejoras de la conectividad podrían impulsar el desarrollo económico en regiones desfavorecidas.[7] Otras empresas multinacionales, como Amazon, también están trabajando en el desarrollo de megaconstelaciones propias –en 2023 lanzaron el llamado "Proyecto Kuiper",[8] que además de contar con satélites en órbita conecta una red de antenas y fibra óptica en tierra, para mejorar el funcionamiento global de la red– así como otros proyectos interesantes de empresas emergentes como Telesat y LeoSat. A raíz de todos estos desarrollos promovidos por empresas privadas, muchas instituciones públicas han planteado el despliegue de megaconstelaciones propias e independientes, para fomentar la soberanía digital y el desarrollo de infraestructuras que puedan beneficiar a la comunidad directamente. Recientemente, la Comisión Europea anunció un estudio de viabilidad relacionado con este proyecto, financiado con más de siete millones de euros y que cuenta con la colaboración de grandes empresas, tanto del campo de las telecomunicaciones como especializadas en ingeniería espacial, incluidas Eutelsat, Orange, Airbus y Thales, entre otras.[9]

Capas de la atmósfera terrestre



Fuente: GAO

La principal aplicación de las megaconstelaciones de satélites es, como hemos visto, el desarrollo y la democratización de las telecomunicaciones, dado que facilitan el acceso a internet y otras tecnologías en áreas remotas. Pero, además, podrían encontrar aplicaciones muy interesantes en otras áreas, como la observación de la Tierra –y, por lo tanto, la investigación científica y el estudio del cambio climático–, la mejora de las infraestructuras de comercio internacional y el perfeccionamiento de los sistemas de posicionamiento y navegación.

En primer lugar, cabe analizar las ventajas de proporcionar servicios de telecomunicaciones de alta velocidad a nivel global, incluyendo telefonía, mensajes de texto, transmisión de datos y acceso a internet. Las megaconstelaciones de satélites pueden llegar a conectar áreas donde la infraestructura de telecomunicaciones tradicional es limitada o, en algunos casos, totalmente inexistente, como zonas rurales, regiones remotas y áreas que sufren desastres naturales o conflictos bélicos. De este modo, podrían reducirse las llamadas "brechas digitales" que provocan que, en áreas como Latinoamérica, haya decenas de millones de personas sin acceso a internet de alta velocidad. En estos casos, el desarrollo de infraestructuras como la fibra óptica suele ser complicado, debido a la orografía y las dificultades que plantea el acceso a ciertas zonas aisladas.[10] La situación es todavía más preocupante en otras zonas como África y el Sudeste Asiático. Según los últimos datos disponibles, casi la mitad de la población mundial –un 46%– sigue sin acceso a internet y, de momento, tan solo un 1% tiene acceso a satélites que permiten conexiones de alta velocidad.[11] En este sentido, el proyecto de OneWeb, por ejemplo, ha conseguido conectar a la red a varios colegios en áreas remotas de Alaska, Nepal, Honduras, Ecuador, Ruanda y Kirguistán. Los nuevos sistemas de satélites pueden ofrecer una conexión a internet fiable a comunidades desfavorecidas, para conseguir atajar la brecha digital y promover la inclusión digital a nivel global.[12] Además, la conexión de estas áreas remotas está directamente relacionada con el crecimiento de los servicios de emprendedores y empresas en áreas remotas, lo que puede impulsar el desarrollo económico y social y mejorar la calidad de vida de millones de personas en todo el mundo–siempre y cuando se comercialice a precios económicos y asequibles.[13]

Otra aplicación importante es la observación de la Tierra, que incluye –entre otras muchas cosas– el seguimiento de fenómenos naturales, el estudio de cambios ambientales ocasionados por la crisis climática y la observación de actividades humanas en todo el mundo. Gracias a contar con un número grande de satélites conectados, las megaconstelaciones pueden utilizarse para recopilar datos en tiempo real e imágenes de alta

PABLO ARTAL

Las megaconstelaciones espaciales son agrupaciones de múltiples satélites en órbita baja terrestre que trabajan de forma coordinada para proporcionar servicios, que incluyen internet de alta velocidad e imágenes de la Tierra. Su importancia radica en su potencial para mejorar la conectividad en todo el mundo, especialmente en regiones remotas y rurales donde las infraestructuras terrestres son limitadas o inexistentes. Puedo dar fe personal de estas ventajas al haberme instalado un sistema de internet en una ubicación rural donde tengo una pequeña viña en la que previamente no había ninguna conexión.

resolución de la superficie terrestre, que pueden transmitirse rápidamente para su análisis, prácticamente en tiempo real. Una de estas aplicaciones recuerda al objetivo original del GPS, dado que las megaconstelaciones ofrecen una alternativa muy interesante para vigilar, monitorear y gestionar el tráfico aéreo y espacial.[14] También pueden imitar a los primeros satélites meteorológicos, con la posibilidad de mejorar y afinar la capacidad de prevención de desastres naturales como huracanes, inundaciones, terremotos y erupciones volcánicas gracias a una transmisión de datos eficiente. Muy pronto, estos sistemas podrían ayudar a salvar vidas, así como a prevenir y preparar a la población con suficiente tiempo como para reducir los daños causados por estos eventos catastróficos. Muchos creen que podrían ser una solución ideal para proporcionar servicios de comunicación de emergencia en situaciones de crisis.[15] En este sentido, pueden prevenirse también otros desastres medioambientales mediante la vigilancia, que podría detectar de forma prematura actividades nocivas como la deforestación, la minería ilegal, la pesca no regulada y la contaminación ambiental, ayudando a proteger el medio ambiente y a promover la sostenibilidad global.

También se espera un gran impacto de esta tecnología en otros sectores. Por ejemplo, en el campo de la agricultura de precisión, los datos de los satélites coordinados e interconectados pueden ayudar en el control y seguimiento de los cultivos, facilitar la predicción de rendimiento y mejorar la gestión de recursos. Gracias a las altas velocidades que ofrecen las megaconstelaciones, además, podrán implementarse sistemas más eficientes para la recopilación de datos con mayor densidad, lo cual es extremadamente valioso en estudios de big data e inteligencia artificial, que permitirán la toma de decisiones en tiempo real para la mejora de las actividades agrícolas. Estos datos pueden incluir alertas tempranas sobre plagas y condiciones meteorológicas adversas, lo que permitirá una mejor gestión de los recursos –agua, fertilizantes, pesticidas, mano de obra– y, en última instancia, un aumento en la productividad.[16] De manera similar, estas aplicaciones de monitoreo pueden encontrar aplicaciones en el estudio de la meteorología y el clima. Según instituciones como la Administración de los Océanos y la Atmósfera (NOAA) de EEUU, las megaconstelaciones permitirán vigilar la salud de nuestro planeta, mediante la observación de la evolución de los bosques, el retroceso de los glaciares o la contaminación del aire y el agua en tiempo real. Estos datos contribuyen también al acervo científico y facilitarán una mejor comprensión del clima, los patrones de migración animal y otros fenómenos globales que, a día de hoy, parecen demasiado complejos de entender y de modelar con los sistemas actuales. En resumen, las megaconstelaciones de satélites tienen una amplia gama de aplicaciones y usos potenciales, mucho más allá de las telecomunicaciones. Estos sistemas de satélites –como el 5G, el internet de las cosas y otras tecnologías– están cambiando la forma en que interactuamos con la tecnología y con la red, gracias a una conectividad más accesible y eficiente.

A pesar de todas estas ventajas, el desarrollo de redes de cientos –incluso miles– de satélites artificiales plantea varios problemas. Uno de los principales problemas es la congestión de la órbita terrestre, que puede aumentar el riesgo de colisiones entre satélites que, a su vez, generan basura espacial y pueden producir accidentes como consecuencia de la reentrada de los desechos en la atmósfera.[18] A medida que se lanzan más satélites al espacio, también se acrecienta el riesgo de colisiones no solo con otros satélites en órbita, sino también con naves tripuladas y estaciones espaciales, algo que resulta extremadamente peligroso para las misiones pero, sobre todo, para los astronautas. Además, la acumulación de basura espacial en órbita puede dificultar el acceso al espacio y aumentar el costo de las misiones espaciales – el despliegue de nuevas redes de satélites podría complicarse debido a las redes ya existentes, una pescadilla que se muerde la cola.[19] Esto se conoce como el "efecto Kessler": conforme aumenta la densidad de satélites, cohetes usados y otra basura espacial, la probabilidad de colisiones no para de aumentar, porque los fragmentos de un choque generan más desechos, más basura, en una especie de reacción en cadena.

Otro problema es la contaminación lumínica generada por estos aparatos en el espacio, dado que los satélites –en su mayoría hechos de metal– reflejan la luz del sol hacia la superficie terrestre, creando destellos y líneas luminosas en el cielo nocturno que pueden interferir con las observaciones astronómicas.[20] Esta contaminación lumínica no solo puede dificultar la observación de objetos astronómicos de baja luminosidad, incluidas estrellas, galaxias y nebulosas, y afectar a la capacidad de los

PABLO ARTAL

Desde un punto de vista tecnológico, los satélites involucrados en estas megaconstelaciones están equipados con una serie de avances que les permiten operar de manera eficiente y coordinada. La miniaturización de componentes, como los sistemas de propulsión, paneles solares más eficientes, y la tecnología de comunicación por láser. Además, la capacidad de automatización y el uso de inteligencia artificial permiten que estas redes se gestionen de manera autónoma, lo que reduce los costos operativos y mejora la eficiencia.

astrónomos para estudiar el universo, sino que también puede afectar a la vida en el planeta, al interrumpir los ciclos naturales de luz y oscuridad, sueño y vigilia, y afectar al comportamiento de los animales y la salud humana. Está demostrado que la contaminación lumínica tiene un impacto negativo para nuestra salud, dado que interrumpe los patrones de sueño y causa estrés y ansiedad.[21]

En general, esto plantea un gran reto de cara a la creación de nueva legislación y regulación. Dada la creciente preocupación por los problemas potenciales asociados a las megaconstelaciones, varias instituciones públicas como la ONU y la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de EEUU están implementando regulaciones y normativas para mitigar –o, al menos, tratar de controlar– sus efectos negativos. La ONU se preocupa por casos extremos, en los que una caída parcial o total de las infraestructuras espaciales podría hacernos retroceder a la Edad Media, incluso de forma irreversible. Ahora, las instituciones están trabajando para actualizar y revisar la legislación espacial que, además de haber cumplido casi sesenta años, solo considera instituciones públicas, como la NASA y la ESA, pero no tiene en cuenta a instituciones y empresas privadas. Algunas de estas directrices han establecido requisitos de coordinación y control públicos del lanzamiento de satélites y proponen reglas para reducir la contaminación lumínica causada por las megaconstelaciones.[22]

Instrumentos de observación de la Tierra

Nota: los destacados en negrita son misiones comerciales

	Tipo de medición	Descripción	Instrumentos y misiones seleccionados
PASIVO	Imágenes pancromáticas	Mide la intensidad de la radiación solar, combinando típicamente 1-2 bandas del espectro electromagnético en una sola banda. Sacrifica el color por el brillo y crea imágenes en escala de grises de alta resolución.	**WV110/WorldView 3 (Maxar Technologies)**
PASIVO	Imágenes multiespectrales	Mide la intensidad de la luz en un número limitado (5-36) de bandas espectrales, p. ej. infrarrojo, visible, ultravioleta, etc.	MSI/Sentinel-2 (Comisión Europea/Agencia Espacial Europea), Landsat-8 (Servicio Geológico de Estados Unidos)
PASIVO	Imágenes hiperespectralest	Mide la intensidad de la luz en más de 37 bandas espectrales. Produce más datos por píxel que las imágenes multiespectrales y es más sensible a las variaciones sutiles de la energía reflejada, p. ej. para clasificar la composición de la superficie geológica o los tipos de vegetación.	Hyperion/EO-1 (Servicio Geológico de Estados Unidos); HYC/PRISMA (Agencia Espacial Italiana)
PASIVO	Radiometría infrarroja	Mide la temperatura y la humedad atmosféricas, el perfil de ozono y los gases de efecto invernadero en la columna total.	AIRS/Aqua (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de EE. UU.); IASI/Metop-C (Eumetsat)
PASIVO	Radiometría de microondas	Mide la intensidad de la radiación térmica, por ejemplo, para determinar la columna de vapor de agua atmosférica integrada y el contenido de agua líquida en las nubes. También es útil para determinar la emisividad de la superficie y la humedad del suelo sobre la tierra, para investigaciones del balance de energía superficial para respaldar estudios atmosféricos y para la caracterización del hielo.	Unidad de sondeo de microondas avanzada (AMSUA)/Metop-C (Eumetsat)
PASIVO	Ocultación de radio GNSS (GNSS-RO) o sondeo de limbo atmosférico	Mide la variación temporal de la longitud de trayectoria excedente de las señales GNSS a medida que son refractadas por la atmósfera. Proporciona perfiles de temperatura y vapor de agua de alta resolución.	Sentinel-6 (Comisión Europea/Agencia Espacial Europea; **satélites SENSE/LEMUR (Spire)**
ACTIVO	Radar de apertura sintética (SAR)	Transmite pulsos electromagnéticos hacia la superficie de la Tierra. La intensidad y la latencia de los pulsos de retorno se utilizan para generar imágenes SAR. Ve a través de la capa de nubes.	Misión de constelación Radarsat (Agencia Espacial Canadiense); **constelación IceEye (IceEye)**
ACTIVO	Detección y medición de distancias por luz (Lidar)	Aplica el mismo principio que el SAR, pero funciona en longitudes de onda infrarrojas, visibles o ultravioleta para medir características topográficas, monitorear glaciares, perfilar nubes, cuantificar componentes atmosféricos, etc.	ALADIN/Aeolus (Agencia Espacial Europea)
ACTIVO	Altimetría de radar	Utiliza la capacidad de medición de distancia del radar para medir el perfil topográfico de la superficie a lo largo de la trayectoria del satélite (por ejemplo, para la topografía de la superficie del océano)	Poseidon 3B/JASON-3 (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de EE. UU. y otros)
ACTIVO	Radar Dispersión	Mide la retrodispersión de radio o microondas en la superficie del mar, en ángulos de incidencia oblicuos, lo que proporciona una medida de la velocidad y dirección del viento cerca de la superficie del mar. Es importante para los modelos numéricos de predicción meteorológica. También se utiliza para estudiar la vegetación, la humedad del suelo, el hielo polar, etc.	ASCAT/Metop-B y -C (Eumetsat); DDMI)/CYGNSS (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de EE. UU.)
	Sistema de detección de gravedad	Observa el campo gravitatorio de la Tierra a lo largo de la órbita.	SuperSTAR/GRACE y GRACE-FO (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio)
	Sistemas de recopilación de datos	Los transpondedores geoestacionarios o de órbita terrestre baja captan señales de transmisores estacionarios y móviles para la recopilación de datos (p. ej., Argos, AIS) o para búsqueda y rescate.	Satélite Argos-4/GEOS&R/MTG-I1 (Eumetsat) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE. UU. AISSat-2 (Agencia Espacial Noruega)

Fuente: OCDE

Desafíos de la nueva economía del espacio

EN ACCIÓN

En la primavera de 2024, Starlink tenía 5.399 satélites, la mitad de todos los que orbitaban alrededor de la Tierra, y aunque la Comisión Federal de Comunicaciones de EEUU había aprobado un año antes el lanzamiento de 7.500, ya tenía planeados otros 8.086 y la intención de solicitar permisos para 30.000. SpaceX transportó en 2023 el doble de carga, la métrica clave, que el resto del mundo junto el año pasado. Su influjo se ha comenzado a percibir en los sectores vinculados con la economía del espacio. La demanda de capacidad de comunicación de los satélites de alto rendimiento crecerá de 1,9 Tbps en 2022 a 46,1 Tbps en 2032, y la participación de las constelaciones NGSO (Non-Geostationary Orbit) pasará del 21% al 52% de esa capacidad total.[23] En los últimos cinco años, el precio de la capacidad media global en los mercados satelitales de vídeo y datos ha caído aproximadamente un -16% (-3% CAGR) y -77% (-26% CAGR) respectivamente,[24] y el precio por Giga de información transmitida ha pasado de los 2-5 dólares al mes en 2021 a 0,2-1,5 dólares en 2023. Los dos operadores de banda ancha de consumo más grandes del mercado norteamericano, Hughes y Viasat, han sufrido caídas en sus ingresos debidas a la nueva competencia y el futuro no parecía halagüeño si no actuaban. Su reacción, junto a empresas como Intelsat y SES, ha consistido en declararse agnósticas de la órbita y evolucionar hacia las ofertas y las estrategias de comunicaciones por satélite multiórbita y están realizando importantes inversiones en esta dirección.

De seguir su progresión, SpaceX conseguirá su objetivo de alcanzar los 29.988 satélites orbitando entre 340 y 614 km sobre la Tierra a finales de la actual década. OneWeb, otro de los referentes en esta carrera, planeaba lanzar cerca de 1.000 más tras superar la quiebra declarada en 2020 gracias a la entrada en su capital de la india Bharti Enterprises y el Gobierno británico. Por su parte, el proyecto Kuiper de Amazon preveía alcanzar los 3.236 satélites y la megaconstelación china de Guowang aspiraba a tener 12.992.[25] Hay lugar para propuestas excéntricas como la de la Agencia Espacial de Ruanda, que ha presentado un plan para crear dos constelaciones de casi 330.000 satélites pequeños.[26] Aunque todo indica que la empresa ruandesa en cuestión, Marvel Space Communications, planeaba vender todos o algunos de los derechos del espectro de radio que obtenga.[27] En total, Euroconsult calcula que se lanzarán más de 2.800 satélites al año entre 2023 y 2032, es decir, ocho satélites por día con una masa total de cuatro toneladas. Pero más allá de los anuncios más o menos creíbles, y atraído por las expectativas de crecimiento de negocio, el sector está demostrando un enorme dinamismo empresarial, con operaciones de integración llamativas en 2023, como el cierre de la adquisición de Inmarsat por parte de Viasat; el anuncio de fusión de Echostar y DISH; y la unión de Eutelsat y OneWeb.[28] Muchos sistemas satelitales han fijado 2025 como el año en que comenzarán a generar ingresos. Sobrevivir a 2024, cuando los operadores de satélites terminen en competencia directa y la presión a la baja sobre los precios obligue a la consolidación, se consideraba decisivo para las startups. Lo que actualmente parece un Salvaje Oeste, donde cualquiera puede reclamar sus derechos podría tener sus primeras víctimas a partir de finales de 2024.[29]

Pese a su indudable valor comercial, el despliegue de las nuevas constelaciones de satélites va a estar marcado por el clima de inestabilidad geopolítica. Los operadores gubernamentales civiles y de defensa son responsables de tres cuartas partes del valor anual del mercado de fabricación y lanzamiento, estimado en de 58.000 millones de dólares. Sólo los seis principales gobiernos u organizaciones espaciales (EEUU, China, Rusia, Japón, India y los gobiernos europeos, la UE y la ESA) representarán dos tercios de la demanda total de fabricación y lanzamiento de satélites en valor.[30] El sistema europeo IRIS² incluirá, por supuesto, aplicaciones dirigidas al mercado como el acceso satelital de banda ancha fija y móvil, redes reforzadas por satélite y servicios basados en la nube, así como enlaces satelitales para servicios B2B. Pero contempla también una enorme variedad de aplicaciones gubernamentales para vigilancia, gestión de crisis y conexión y protección de infraestructuras clave. Desde el punto de vista de la innovación de frontera, destaca el protagonismo que la UE quiere otorgarle como punto de lanzamiento de las futuras comunicaciones cuánticas, a través de

Efectos potenciales del lanzamiento, operación y eliminación de satélites

Fuente: GAO

la Infraestructura Europea de Comunicación Cuántica (EuroQCI), incluida en el Programa de Conectividad Segura de la UE. Una de sus principales funciones será la distribución cuántica de claves criptográficas (QKD) cuando la tecnología esté suficientemente madura para ser utilizada en la protección de información clasificada.

Debe asegurar la viabilidad de otra pieza clave de la estrategia europea, el Programa Govsatcom, centrado en los servicios de comunicaciones. En la actualidad, los registros de frecuencias están disponibles a través de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. La Comisión Europea quiere que los Estados miembro impulsen un proceso abierto y transparente de firma de acuerdos de licencia dirigidos a la prestación de servicios gubernamentales. Y, para hacerlo con garantías, se considera vital que los activos espaciales del Programa se lancen desde el territorio de la UE y que ésta sea propietaria de todos los activos, materiales e inmateriales, relacionados con la infraestructura gubernamental desarrollada en el marco del Programa, excepto de la infraestructura terrestre EuroQCI.[31] Más allá de las tecnologías cuánticas, se espera que el sistema IRIS² potencie la banda ancha de alta velocidad y elimine las zonas muertas en las comunicaciones, reforzando la cohesión de los territorios de los Estados miembro. Su implementación debe seguir un enfoque incremental, comenzará sus servicios en 2024 y debe alcanzar la capacidad operativa total en 2027.[32]

La eficiencia en la colaboración público-privada va a resultar clave para que las constelaciones de satélites no se conviertan en una fuente de vulnerabilidad para los países. En otoño de 2023, SpaceX transportó 13 satélites denominados de Tramo 0 de reconocimiento, vigilancia, inteligencia y comunicaciones, propiedad de la Agencia de Desarrollo Espacial (SDA) del ejército estadounidense. Su destino es la futura megaconstelación de Arquitectura Espacial de Guerra Proliferada (PWSA), pieza central de la estrategia CJADC2 (Comando y Control Conjunto Combinado de Todos los Dominios). La SDA ha sido creada para acelerar los procesos de adquisición de programas espaciales, de hecho, su lema es "Semper Citius" (Siempre más rápido). El Pentágono pretende construir muy rápidamente megaconstelaciones de capas de satélites PWSA en órbitas terrestres bajas, una forma nueva de vigilancia infrarroja persistente para rastrear misiles y transmitir información. El concepto que subyace tras la iniciativa CJADC2 es fusionar y compartir información entre todas las ramas de las fuerzas armadas, el espacio y la red cibernética. Sin una megaconstelación de satélites, eso es imposible. Cada dos años, la SDA adquirirá y lanzará un nuevo tramo de satélites para cubrir las diferentes capas. En septiembre de 2024, los lanzamientos previstos del Tramo 1, embarcados en cohetes Falcon 9 y Vuclan de ULA (United Launch Alliance) debían proporcionar capacidad de combate. Los futuros satélites de comunicaciones del Tramo 2, que serán construidos y operados por Northrop Grumman y Lockheed Martin, ofrecerán la capa de transporte.

Otro ejemplo de colaboración con el mundo empresarial para reforzar la seguridad ha sido el encargo por parte del Departamento de Defensa de EEUU a Starlink del desarrollo de una versión militar llamada Starshield,[33] capaz de realizar observación de la Tierra, comunicación y carga útil personalizada. Dado que estas constelaciones de satélites utilizan comunicaciones láser, no se puede descartar la posibilidad de armarlas con armas no cinéticas espacio-Tierra o espacio-espacio para neutralizar los objetivos terrestres o los drones, gracias a la menor interferencia atmosférica. La firma del Acuerdo Básico de Intercambio y Cooperación (BECA), que otorga a India acceso a inteligencia geoespacial con la que puede mejorar la precisión de sus armas y aumenta su cooperación con Estados Unidos, ha sido interpretado, en ese sentido, como un peligro para el equilibrio estratégico del sur de Asia. El Tratado sobre el Espacio Ultraterrestre[34] de 1967 se limita a impedir la ubicación en el espacio de armas de destrucción masiva, por eso se han levantado voces pidiendo su actualización para evitar que se militarice, en particular la franja LEO.

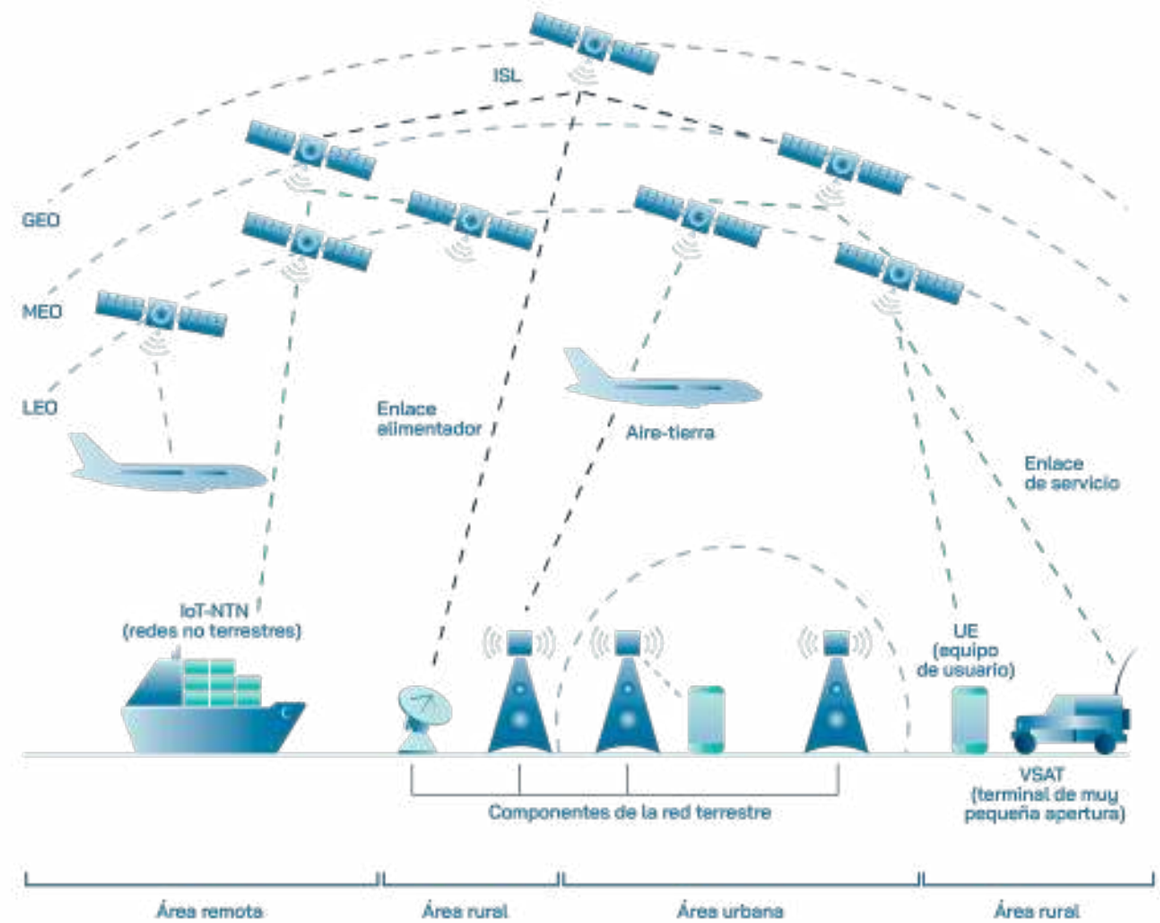
El Gobierno estadounidense ha lanzado ya firmes advertencias a sus socios sobre el riesgo de ciberespionaje a la industria espacial comercial, con casos como el boqueo y la falsificación del GPS por parte de Rusia para ocultar los movimientos de su presidente. Las operaciones ciberhostiles en el espacio suelen llevarse a cabo violando el sistema de control terrestre o interceptando señales y atacando sensores, actuadores u otros dispositivos electrónicos. En el primer caso, el uso de servicios terrestres basados en la nube, como Amazon Web Services o Azure de Microsoft, ha aumentado el riesgo de ciberataque. En el segundo caso, los sensores remotos son vulnerables porque los protocolos de comunicación utilizados se basan en modelos TCP/IP, lo que significa que están accesibles a través de Internet.

Para reforzar la seguridad, la Agencia Espacial Europea (ESA) ha establecido recientemente un campo de formación cibernética en el Centro Europeo de Educación y Seguridad Espacial (ESEC) en Bélgica.[35] La era del 6G traerá enlaces entre satélites de muy alta velocidad y la red incorporará toma de decisiones distribuida, la recuperación autónoma de fallos, la resiliencia y la escalabilidad. La inteligencia artificial estará presente en todos los niveles para hacerlo posible.[36]

Otro actor clave desde el punto de vista geopolítico es China, que está construyendo nuevas áreas para el despliegue de la red de satélites multimedia de banda ancha de órbita baja G60 (nombre de la autopista que atraviesa varias ciudades de la región del delta del río Yangtze) Starlink, una iniciativa del Valle de Innovación en Ciencia y Tecnología. En la primera fase estaba previsto implementar 1.296 satélites a los que se añadirán más de 12.000 en el futuro. El centro de computación inteligente G60 de Tencent hará las tareas de soporte para el almacenamiento y procesamiento de información. Cuenta con 800.000 servidores que le proporcionan 10 veces más potencia de computación que la del centro de supercomputación número uno del mundo.[37] La otra gran apuesta china es el plan nacional de internet por satélite Guowang, considerado como la respuesta de China al Starlink de SpaceX. Impulsado por una empresa estatal creada en 2021, incluye la apertura de un centro de fabricación capaz de producir 300 satélites al año, con ahorros de costes que se estiman en torno al 35%, y prevé configurar una megaconstelación de 13.000 unidades. En el desarrollo del sector de satélites pequeños se ha implicado a la Academia de Tecnología Espacial de China, de propiedad estatal, la Corporación de Industria y Ciencia Aeroespacial de China y la Academia de Innovación para Microsatélites dependiente de la Academia de Ciencias de China, además de compañías como GalaxySpace y HKATG de Hong Kong.[38]

Fuera del ámbito geopolítico, en el puramente comercial, las megaconstelaciones satelitales están permitiendo concebir nuevos sectores inimaginables hasta

Visión general de la conectividad de redes no terrestres



Fuente: Banco Mundial

JAVIER VENTURA TRAVESET

Nuestros servicios de comunicación y navegación lunar futuros serán, sin duda, un facilitador esencial en el establecimiento de bases humanas permanentes en la superficie luna. Y esa implantación humana futura abre nuevos desafíos que requerirán consensos internacionales y el desarrollo de tecnologías específicas. Por ejemplo, la necesidad de coordinar el tráfico futuro en órbita lunar para prevenir colisiones, reduciendo riesgos para las naves espaciales y optimizando las operaciones; una gestión eficaz y coordinada internacionalmente de los recursos lunares; la protección de la luna y del espectro lunar para garantizar sus condiciones privilegiadas para la realización de actividades científicas; el desarrollo de tecnologías que permitan una mitigación efectiva contra los efectos de la radiación espacial en misiones con presencia humana continua en la superficie lunar; etc.

hace apenas unos pocos años. Por ejemplo, las redes de espacio profundo (DSN) impulsadas por países como Estados Unidos, Rusia, China, la Unión Europea, India y Japón, podrán transmitir información de forma más eficiente si pueden utilizar satélites de retransmisión que orbiten alrededor de Marte y Tierra. Esto ha dado lugar a un nuevo paradigma llamado internet interplanetario y está provocando una redefinición de las redes espaciales para incorporar a cualquier tipo de nave espacial, desde satélites a estaciones u hoteles espaciales, que pueda utilizarse como nodo de red. También se incluirán los vehículos aéreos no tripulados (UAV) que operen dentro de nuestra atmósfera, en particular en áreas como los océanos, lejos de la cobertura de estaciones terrestres. La integración de los UAV con satélites y estaciones base terrestres costeras, para dar servicios de conectividad en 5G, encaja bien con la evolución esperada de la industria marítima global, que puede crecer a una tasa anual compuesta de alrededor del 6% hasta 2026. Otra vertiente tecnológica por desarrollar está relacionada con los sistemas integrados de internet de las cosas (IoT) por satélite para ofrecer soluciones de cobertura global, ya sea proporcionando una solución rentable para la interconexión de sensores y actuadores del internet of robotic things (IoRT), ya sea conectando segmentos de redes de IoT terrestre a sistemas de IoT a través de banda ancha satelital para propiciar el internet de todo en todas partes (IoEE).[39]

En el ámbito estrictamente tecnológico, toda esta revolución está propiciando la consolidación de un nuevo concepto denominado informática y redes integradas para megaconstelaciones de satélites LEO (ICN-LSMC), en el que se rompen las barreras entre informática y redes y se permite una gestión unificada de ambas.[40] Es sólo una de las llamadas de atención que se están produciendo sobre la necesidad de establecer mecanismos que ayuden a orquestar ese nuevo ecosistema 'flotante'. Ya se habla incluso de una "fiebre por la tierra" en el espectro radioeléctrico. En el centro del foco se sitúa la falta de facultades operativas de la Unión Internacional de las Telecomunicaciones. En la actualidad, necesita que las autoridades estatales actúen como intermediarias para garantizar el cumplimiento por parte de las empresas del Reglamento de Radiocomunicaciones, en el que no está previsto un mecanismo adecuado para limitar la proliferación de satélites en el espacio.

Si bien la UIT se ocupa de gestionar el uso de slots en la órbita geoestacionaria, no desempeña el mismo papel en LEO. Los países deben tratar las frecuencias como recursos limitados a los que otros deben poder acceder de forma equitativa y, por lo tanto, deben limitar su propio uso. Pero las empresas no forman parte de ese mecanismo de equilibrio del mercado y no tratan directamente con la UIT. Solicitan y obtienen licencias de su regulador nacional, que se limita a presentar una descripción general de la megaconstelación ante la UIT, incluidas las frecuencias que pretende utilizar.[41] Y las notificaciones a la Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Ultraterrestre (UNOOSA) carecen de requisitos de cumplimiento exigibles. El ciclo de la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2027 (CRM-27) podría introducir un cambio fundamental en la gobernanza, en favor de una mayor cooperación internacional necesaria para gestionar eficazmente los recursos espaciales críticos. Pero podría reavivar también el debate sobre los mandatos multilaterales que ha exacerbado las tensas relaciones internacionales en los últimos años. En esencia se debate si las actividades orbitales deben estar regidas por una o varias instituciones y el problema es que encontrar puntos en común se vuelve cada vez más difícil a medida que crecen los intereses de los países por el espacio.

Por otra parte, mecanismos como los límites de densidad de flujo de potencia equivalente (EPFD) del artículo 22 del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT desempeñan un papel fundamental para facilitar un entorno de mercado dinámico y, al mismo tiempo, garantizar el funcionamiento sin interferencias de todos los sistemas satelitales. Se trata de un tema controvertido que afecta a la potencia que deben tener las señales de los satélites no geoestacionarios para no perturbar la actividad de las naves espaciales geoestacionarias. SpaceX y Amazon sostenían que las normas EPFD estaban obsoletas después y restringían sus planes para crear megaconstelaciones, mientras que operadores GEO como Viasat y SES advertían de que cambiar las reglas perturbaría la estabilidad de un régimen regulatorio que ha permitido que los negocios espaciales proliferen en los últimos años. La CMR-23 se cerró en diciembre de 2023 con la disposición de los reguladores internacionales a permitir estudios técnicos para cambiar los límites de potencia de transmisión satelital con la condición de que no se derive de ellos ninguna acción regulatoria hasta al menos 2031. Se someterán a análisis en la próxima CRM-27.[42]

El asunto de la gobernanza cobra especial importancia cuando se aborda la cuestión de la enorme cantidad de objetos que orbitan a la deriva y sin función alguna. La Oficina de Desechos Espaciales de la Agencia Espacial Europea calcula que actualmente hay unos 22.000 objetos artificiales de un tamaño de varias decenas de centímetros orbitando alrededor de la Tierra, de los cuales sólo 2.300 son satélites en funcionamiento.[43] Existe un acuerdo llamado Compendio de Desechos Espaciales de la ONU, firmado principalmente por estados y organizaciones europeos, que establece estándares para la Mitigación de Desechos Espaciales (SDM). Pero, como sucede en otros ámbitos relacionados con la economía del espacio, se limita a difundir información sobre los últimos métodos de limpieza de escombros y carece de fuerza coercitiva para imponer las buenas prácticas.

Las reentradas de satélites desde la megaconstelación Starlink por sí solas podrían depositar más aluminio en la atmósfera superior de la Tierra que los meteoritos, y podrían convertirse en la fuente dominante de alúmina de gran altitud.[44] La compañía ha anunciado que sacará activamente de órbita sus satélites al final de su vida operativa de cinco a seis años, pero ese es un proceso que se desarrolla durante seis meses, por lo que aproximadamente el 10% podría estar fuera de órbita en cualquier momento. Casi dos toneladas de satélites de Starlink tendrán que reingresar diariamente a la atmósfera, lejos de las 54 toneladas diarias de meteoritos, pero los satélites son en su mayoría de aluminio, mientras que los cuerpos espaciales no artificiales tienen de media un 1%. Por si fuera poco, las primeras etapas de los cohetes Soyuz empleados por OneWeb no son reutilizables, ni las reentradas de la segunda etapa son controlables, y lo mismo sucede en el caso de la constelación de la Larga Marcha de la china Guowang. En materia de sostenibilidad, los problemas también se trasladan a la Tierra. Las megaconstelaciones LEO proporcionan velocidades de banda ancha sustancialmente mejoradas para comunidades rurales y remotas, pero generan aproximadamente entre seis y ocho veces más emisiones (250 kg CO2eq/suscriptor/año) que la banda ancha móvil terrestre comparativa. En el peor de los casos, las emisiones aumentan entre 12 y 14 veces más (469 kg CO2eq/abonado/año).[45] No todo son estrellas brillantes en el firmamento.

Las redes españolas apuntan al 5G y a la vigilancia

ESPAÑA

La innovación con sello español lleva transformando el sector tecnológico espacial desde hace varias décadas, con un estallido clave durante los años 80. Está ampliamente aceptado que las redes terrestres (TN) por sí solas no van a poder satisfacer los requisitos del mercado NB-IoT (internet de las cosas de banda estrecha), lo que obliga a buscar fórmulas alternativas dada la expansión exponencial de las aplicaciones de IoT vinculada a la red de comunicaciones móviles de quinta generación.[46] La empresa española Sateliot[47] lanzó los primeros cuatro nanosatélites 6U de su futura constelación de órbita terrestre baja (LEO) bajo los estándares 5G NB-IoT NTN en agosto de 2024, a bordo de un cohete Falcon 9, desde la Base Aérea de Vandenberg (California, EEUU) dentro de la misión Transporter-11 de SpaceX. Su propósito es ampliar la cobertura de los operadores de telecomunicaciones móviles a cualquier lugar del planeta, para lo cual ha integrado su pila de comunicaciones por satélite en la red de segmento terrestre como servicio (GSaaS) de Leaf Space. Uno de los accionistas de Sateliot es Indra, impulsora también, junto a Enaire, de Startical, una compañía concebida para poner en órbita una constelación de 240 pequeños satélites con el objetivo de prestar servicios que mejoren la gestión y la seguridad del tráfico aéreo en todo el mundo.

El impulso de Sateliot ha permitido desarrollar actividades asociadas en nuestro país, como la propia fabricación de los satélites, que ha corrido a cargo de Alén Space,[48] una compañía del grupo GMV. De sus talleres han surgido los cuatro nanosatélites de tipo CubeSat 6U, con unas dimensiones de 20x10x35 cm y un peso neto de 10 kilos, diseñados para tener una vida útil de cinco años y para operar en una órbita heliosíncrona (SSO) a una altura de entre 500 y 600 kilómetros. Unos meses antes del arranque de la constelación de Sateliot, en octubre de 2023, el lanzador europeo Vega transportó desde la Guayana Francesa nueve plataformas diferentes y el primer trío de nanosatélites del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), que se integrarán en la futura constelación ANSER, que estará dedicada a la monitorización de la calidad del agua de marismas, embalses, lagunas y ríos de la Península Ibérica.

Precisamente, Alén Space forma parte del consorcio Deimos junto a Satlantis y DHV Technology. Se trata de uno de los dos grupos de empresas españolas a los que la Agencia Espacial Europea ha adjudicado los primeros contratos para el desarrollo del componente español de la Constelación Atlántica, uno de cuyos impulsores ha sido el comisionado del PERTE Aeroespacial, Miguel Belló. El otro adjudicatario es Open Cosmos Europe y lo integran Telespazio, Hispasat, ARQUIMEA y Leaf Space. Los contratos responden al acuerdo firmado en 2023 entre España y la ESA, que contemplaba en un principio la colaboración de Portugal y al que se sumó poco después la Agencia Espacial de Reino Unido, para desarrollar una constelación de 16 satélites de observación de la Tierra, así como los Spainsat NG, dos grandes satélites de comunicaciones seguras, y la sonda científica de tamaño medio Arrakihs. En una fase inicial, las empresas contratadas han consolidado los requisitos de la misión de la constelación en colaboración con la Agencia Espacial Española como usuario final y la ESA como supervisor.[49]

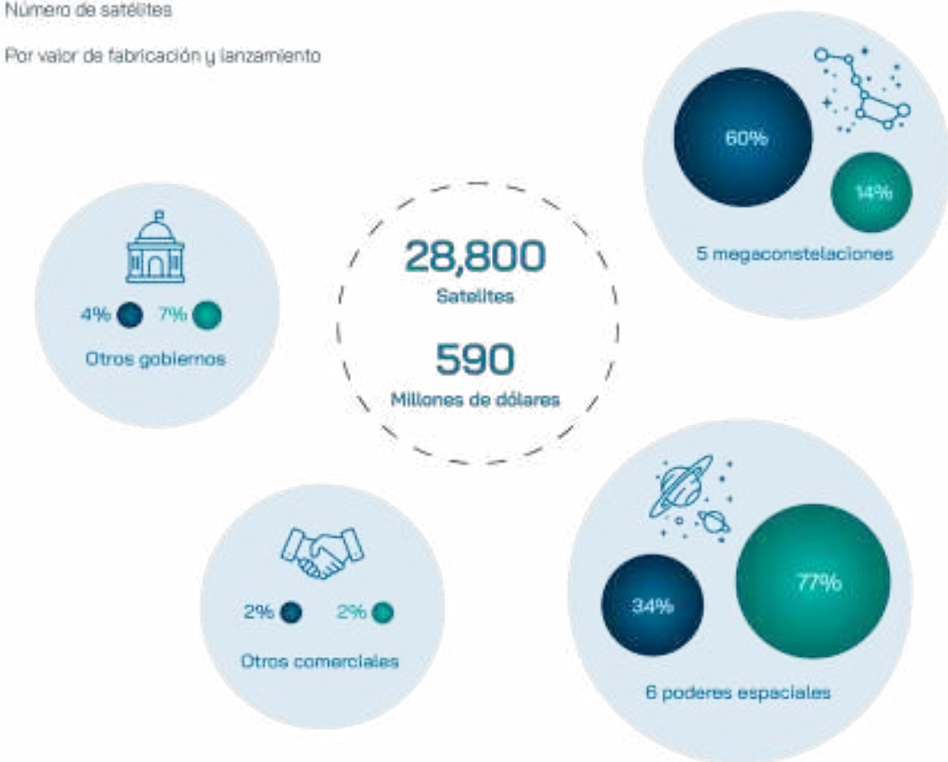
En el ámbito de la defensa, Thales Alenia Space ha venido trabajando en los nuevos satélites SpainSat NG I y II en su planta de Tres Cantos (Madrid), que dotarán a las Fuerzas Armadas españolas de un sistema de comunicaciones seguro y resiliente, ubicado entre los diez más modernos del mundo.

Mercado satelital en 2032

Las constelaciones y/o los satélites pequeños distorsionan la estructura del mercado.

La demanda en número de satélites no significa un alto valor de mercado

- Número de satélites
- Por valor de fabricación y lanzamiento



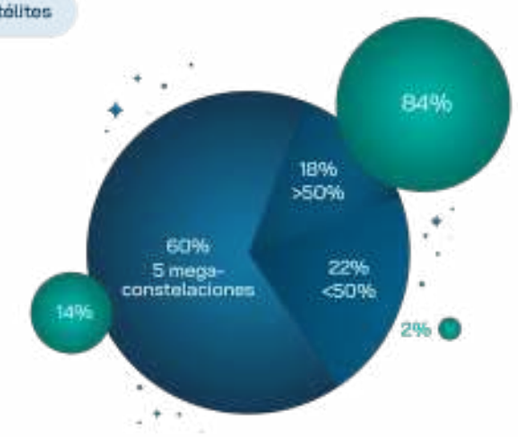
Los 6 poderes espaciales

Estados Unidos | Rusia | China | India | Japón | Europa

Fuente: Euroconsult

Las 5 megaconstelaciones dominan en número de satélites

- Por unidades
- Por valor



*Las 5 megaconstelaciones son Starlink, OneWeb, Lightspeed, Kuiper, GuoWang

Dos décadas de mercado comercial de comunicaciones GEO

Promedio anual en número de satélites

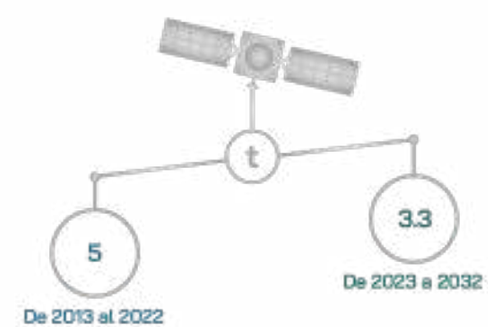
De 2013 al 2022

12 Satelites

De 2023 a 2032

14 Satelites

Masa media en toneladas



Relación de notas

[1] Mary Crooks. "Historic Article: Oct 4, 1957 CE: USSR Launches Sputnik". National Geographic. Publicado el 19/10/2023, consultado el 28/04/2024.

[2] Jonathan O'Callaghan. "The Mega Constellations Are Already Here. The Time For Polite Concern Is Over". Forbes. Publicado el 28/08/2020, consultado el 28/04/2024.

[3] Jermaine Walker. "Global Positioning System History". NASA. Publicado el 27/10/2012, consultado el 28/04/2024.

[4] ESA (2023). "Galileo, how you've grown". Publicado el 07/03/2023, consultado el 28/04/2024.

[5] Jonathan Amos. "Megaconstelaciones de satélites" de OneWeb: el multimillonario plan para conectar todos los rincones del mundo a internet". BBC News Mundo. Publicado el 28/02/2019, consultado el 28/04/2024.

[6] Elizabeth Howell et al. "Starlink satellites: Facts, tracking and impact on astronomy". Space.com. Publicado el 20/02/2024, consultado el 28/04/2024.

[7] BA Gur, J Kulesza. Telecommunications Policy, 2024, 48, 5, 102731, DOI: 10.1016/j.telpol.2024.102731

[8] Thomas Kohnstamm. "Everything you need to know about Project Kuiper, Amazon's satellite broadband network". About Amazon. Publicado el 30/10/2023, consultado el 28/04/2024.

[9] Jonathan O'Callaghan. "Europe Wants To Build Its Own Satellite Mega Constellation To Rival SpaceX's Starlink". Forbes. Publicado el 23/12/2020, consultado el 28/04/2024.

[10] Dolores Martos. "Satellite connectivity closes the digital gap in Latin America". Telesat. Publicado el 14/06/2023, consultado el 28/04/2024.

[11] Dimitri Buchs. "Satcom for universal broadband access". Euroconsult, julio de 2021. Consultado el 28/04/2024.

[12] José Tomás Palacín. "El fin de la brecha digital llegará con una "megaconstelación" de satélites". Innovaspain. Publicado el 06/03/2019, consultado el 28/04/2024.

[13] Neel V. Patel. "Starlink: la solución a la brecha digital que casi nadie podrá pagar". MIT Technology Review. Publicado el 09/09/2021, consultado el 28/04/2024.

[14] Fermín Romero. "Las megaconstelaciones satelitales y la gestión del tráfico espacial". A21 México. Publicado el 26/05/2023, consultado el 28/04/2024.

[15] "Improving Emergency Management Communications with Starlink Satellite Internet". The Bravo Zulu, n.d. Consultado el 28/04/2024.

[16] "How Starlink Will Impact the Agriculture Industry". IP Access. Publicado el 21/03/2023, consultado el 28/04/2024.

[17] NOAA (n.d.) "Remote sensing". Consultado el 28/04/2024.

[18] Fabian Zander. "What's the risk of being hit by falling space debris?" BBC Future. Publicado el 27/09/2022, consultado el 28/04/2024.

[19] Deloitte (2019). "High speed from low orbit: A broadband revolution or a bunch of space junk?". Consultado el 28/04/2024.

[20] Tory Shepherd. "Picture imperfect: light pollution from satellites is becoming an existential threat to astronomy". The Guardian. Publicado el 05/01/2023, consultado el 28/04/2024.

[21] Jonathan O'Callaghan. "Satellite Constellations Could Harm the Environment, New Watchdog Report Says". Scientific American. Publicado el 24/11/2022, consultado el 28/04/2024.

[22] Shaoni Bhattacharya. "What is the future of megaconstellations?" BBC Sky at Night. Publicado el 13/01/2023, consultado el 28/04/2024.

[23] Regulation of NGSO Satellite Constellations, The World Bank, 2024. Consultado el 14/04/2024

[24] FSS Capacity Pricing Trends, Euroconsult, febrero de 2024

[25] Erik Gregersen, "Megaconstelation", Encyclopedia Britannica, 1 de marzo de 2024, Consultado el 13 de abril de 2024

[26] Revolutionary rocket eats for the stars, gov.uk, Tayyab Ali, The Mega Satellite Constellation Race: Global Implications, Stratheia, 10 de enero de 2024

[27] Byers M, Boley A. Mega-constellations. En: Who Owns Outer Space?: International Law, Astrophysics, and the Sustainable Development of Space. Cambridge Studies in International and Comparative Law. Cambridge University Press. 2023. Consultado el 13/04/2024

[28] Declan Dundas, "Tech Policy Trends 2024: The year of mega-constellations", Access Partnership, 7/3/2024, consultado el 13 de abril de 2024

[29] Declan Dundas, "Tech Policy Trends 2024: The year of mega-constellations", Access Partnership, 7de marzo de 2024, consultado el 13 de abril de 2024

[30] "Satellites to be Built & Launched", Euroconsult, 12 de diciembre de 2023

[31] Reglamento UE 2023/588 del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establece el Programa de Conectividad Segura de la Unión para el período 2023-2027, Diario Oficial de la Unión Europea, 15 de marzo de 2023

[32] IRIS²: the new EU Secure Satellite Constellation, Comisión Europea

[33] Mike Wall, "SpaceX reveals 'Starshield' satellite project for national security use", space.com, 7 de diciembre de 2022

[34] https://2009-2017.state.gov/t/isn/5181.htm

[35] Devanshu Jha et al. Safeguarding the final frontier: Analyzing the legal and technical challenges to mega-constellations, Journal of Space Safety Engineering, diciembre de 2022, doi.org/10.1016/j.jsse.2022.08.006

[36] "El futuro de la comunicación: megaconstelaciones satelitales", Cyfirma, 29 de diciembre de 2023

[37] "G60 Starlink alcanzará una red de más de 12.000 satélites en el futuro", Shanghai Securities News, 25 de julio de 2023

[38] Andrew Jones, "China could be planning a second broadband megaconstellation", SpaceNews, 08 de agosto de 2023

[39] M. Y. Abdelsadek et al., Future Space Networks: Toward the Next Giant Leap for Humankind, IEEE Transactions on Communications, 2 febrero de 2023, doi: 10.1109/TCOMM.2022.3228611

[40] T. Huang et al., IEEE Wireless Communications, 2024. doi: 10.1109/MWC.006.2300048

[41] Aaron C. Boley, Michael Byers, Satellite mega-constellations create risks in Low Earth Orbit, the atmosphere and on Earth, Scientific Reports, 20 de mayo de 2021, doi.org/10.1038/s41598-021-89909-7

[42] Jason Rainbow, "WRC-23 reaches tough compromise on satellite power limit review", Space News, 13 de diciembre de 2023

[43] David Galadí-Enríquez, Satellite megaconstellations pose threat to groundbased astronomy, ROOM, n. d.

[44] Aaron C. Boley, Michael Byers, Satellite mega-constellations create risks in Low Earth Orbit, the atmosphere and on Earth, Scientific Reports, 20 de mayo de 2021, doi.org/10.1038/s41598-021-89909-7

[45] Edward Oughton et al. Sustainability assessment of Low Earth Orbit (LEO) satellite broadband mega-constellations, septiembre de

2023 doi: 10.21203/rs.3.rs-3325730/v1 consultado el 13 de abril de 2024

[46] Ricardo Fernández Rubio, "Design and Analysis of NB-IoT Non-Terrestrial Networks Links", Proyecto fin de Máster, Universitat Oberta de Catalunya, entregado en julio de 2023

[47] https://sateliot.space/es/

[48] https://alen.space/es/alen-space-disena-y-fabrica-cuatro-satelites-de-la-constelacion-5g-de-sateliot/

[49] Andrew Parsonson, "ESA Awards Contracts for Spain's Contribution to Atlantic Constellation", European Spaceflight, 24 de mayo de 2024, consultado el 29/08/2024

09

El despertar del metanol ‘verde’

El despertar del metanol ‘verde’

El metanol es el alcohol más sencillo. Un compuesto químico de la misma familia que el etanol, el alcohol etílico de la cerveza, el vino y las bebidas espirituosas, también incoloro y de olor característico, pero mucho más tóxico. El metanol puede causar ceguera y, en dosis mayores, llega a ser letal para los humanos.[1] Sin embargo, es un producto muy interesante desde el punto de vista químico, tanto por sus aplicaciones como un combustible potencialmente sostenible y renovable, como por sus usos como materia prima para producir otros productos de alto valor añadido, como el formaldehído, el ácido acético, las olefinas y, a partir de estos, sustancias más complejas como los polímeros y los plásticos. Actualmente se producen unos 100 millones de toneladas de metanol al año y varios estudios prevén que la producción se quintuplicará antes de 2050, gracias al desarrollo de las tecnologías de captura de carbono y el crecimiento de los combustibles sintéticos. La gran mayoría de estos 500 millones de toneladas serán metanol “verde”, producido con electricidad limpia a partir de fuentes renovables, en lugar de depender de las extracciones de combustibles fósiles, como ocurre hoy en día.[2] La producción sostenible de metanol tanto a partir de CO_2 como a partir biomasa, junto con sus propiedades únicas como combustible y materia prima, puede convertirlo en un componente clave para la transición ecológica. La integración de metanol en las industrias del combustible, química y energética no solo ofrece muchos beneficios ambientales, sino también grandes oportunidades económicas y tecnológicas.

Un compuesto para renovar todos los sectores

POR DENTRO

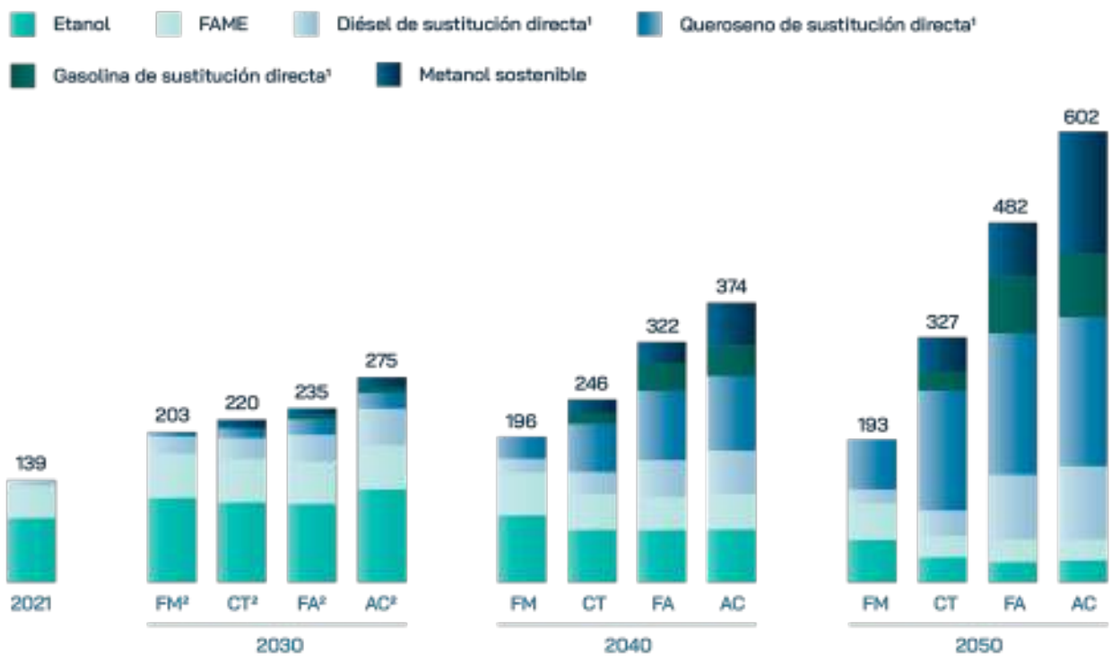
Como ocurre en el caso del hidrógeno, actualmente la mayor parte del metanol se genera a partir de combustibles fósiles, a través de un proceso químico de "crackeo" y reformado del gas natural. Al utilizar combustibles fósiles, este método de producción no es renovable. Además, el proceso de reformado utiliza reactores que requieren altas presiones y temperaturas para funcionar y poder convertir el metano en una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, conocida como syngas (gas de síntesis) y, después, en metanol. Todo este proceso gasta una gran cantidad de energía y, a su vez, genera dióxido de carbono como principal subproducto. El cómputo global de emisiones varía mucho según el uso final del metanol, pero se calcula que producir un kilogramo de metanol genera aproximadamente medio kilo de CO_2 – algo insostenible sin métodos de captura eficientes y en una economía que trata de reducir las emisiones de carbono al mínimo.[3] De nuevo, igual que con el hidrógeno verde, la utilización de fuentes de energía renovables podría transformar la producción de metanol en un proceso mucho más sostenible y, por tanto, interesante para la industria del siglo XXI.

La producción sostenible de metanol busca alternativas que minimicen las emisiones de gases de efecto invernadero y utilicen fuentes de energía renovable, como la energía solar y la eólica, entre otras.[4] Una de las principales innovaciones es la utilización de CO_2 capturado como materia prima. En este enfoque, el CO_2 proviene de la captura de fuentes industriales o, en algunos casos, de la captura directa del aire, y se combina con hidrógeno producido de forma limpia mediante electrólisis del agua. La electrólisis divide el agua en sus componentes hidrógeno y oxígeno, y el primero se combina con el CO_2 capturado en un proceso de síntesis para producir metanol. Este método no sólo recicla dióxido de carbono, sino que también utiliza energía renovable, reduciendo la huella de carbono de la producción de metanol. Otro método muy atractivo es la electrocatálisis, que utiliza los avances en química y catálisis que son capaces de transformar syngas y otras mezclas similares, como CO_2 e hidrógeno, en metanol, utilizando únicamente electricidad limpia y un dispositivo conocido como "electrolizador", que es básicamente una especie de pila invertida, donde la corriente eléctrica induce una reacción química. Existen varias plantas piloto que están desarrollando sistemas para convertir CO_2 en metanol directamente, para mejorar no solo la eficiencia, sino también la sostenibilidad del proceso.[5] El coste de las tecnologías emergentes, como la captura de CO_2 y la electrólisis del agua, puede ser elevado en comparación con los métodos tradicionales, derivados de los combustibles fósiles. Además, la infraestructura necesaria para estas tecnologías aún está en desarrollo, y se requiere una inversión significativa en I+D para escalar su implementación, además de políticas progresistas y regulaciones que fomenten la implementación de síntesis más sostenibles.

La aceptación del metanol verde en el mercado dependerá en gran medida de la competitividad económica frente a alternativas que, actualmente, son todavía más baratas.[6] Otra opción posible es la producción de biometanol a partir de biomasa. Como ocurre en la fabricación de bioetanol, descrita en el capítulo sobre combustibles sostenibles, la biomasa, que incluye residuos agrícolas, forestales y urbanos, puede convertirse fácilmente en gas de síntesis mediante distintos procesos químicos y biológicos. Este syngas puede procesarse luego para obtener metanol a partir de una fuente renovable de carbono, algo que promueve la economía circular, la reducción de residuos y, sobre todo, reduce nuestra dependencia de los combustibles fósiles. Sin embargo, como ocurre con el bioetanol y el biodiésel, es importante priorizar el uso de recursos de desecho y no utilizar materias primas que podrían servir para la alimentación de personas y animales en la producción de biometanol, para evitar problemas de abastecimiento graves.[7]

El metanol verde, junto con otros compuestos similares como el etanol, ha ganado reconocimiento en los últimos años como una alternativa eficiente y versátil a los combustibles fósiles. Es más barato de producir que otras alternativas sintéticas y, además, menos inflamable y, por tanto, más seguro que la gasolina y otros derivados del petróleo.[8] Aparte de estas propiedades químicas únicas, la posibilidad de generar metanol "verde" a partir de energía renovable y dióxido de carbono capturado y reciclado ofrece una gran ventaja en términos de reducción de emisiones y alternati-

Demanda de combustible sostenible por tipo de combustible final, Mt por año



Nota: solo líquidos

1 Los combustibles de reemplazo incluyen combustibles 100% mezclados, como HVO, HEFA y diésel/queroseno PtL

2 DI = Disminución del impulso; TA = Trayectoria actual; AA = Aceleración adicional; CA = Compromisos alcanzados

Fuente: McKinsey

vas sostenibles, libres de tensiones geopolíticas.[9] Por ejemplo, en el sector del transporte, el metanol destaca como una alternativa viable y sostenible a los combustibles fósiles tradicionales. Puede mezclarse con gasolina en diferentes proporciones que no solo ofrecen un rendimiento comparable al de los motores que funcionan exclusivamente con gasolina, sino que también reducen las emisiones de gases contaminantes, como monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx). El metanol, además, tiene un alto índice de octano, lo que significa que puede mejorar el rendimiento del motor y reducir la tendencia a la detonación de la gasolina, proporcionando una alternativa más segura.[10]

Como el hidrógeno, el metanol también puede utilizarse en pilas de combustible, en vez de quemarlo, para conseguir energía eléctrica directamente. Las pilas de combustible de metanol, también conocidas como DMFC por sus siglas en inglés, convierten la energía química del metanol directamente en electricidad a través de una reacción electroquímica, y solo generan agua y dióxido de carbono como subproductos. Si el metanol ha sido producido a partir de CO_2 reciclado, las emisiones totales de esta combustión son neutras en emisiones, debido al ciclo cerrado de carbono. Estas pilas DMFC son especialmente útiles en aplicaciones portátiles, como teléfonos móviles, laptops y otros dispositivos electrónicos portátiles, debido a su alta densidad de energía y la facilidad de manejo del metanol en comparación con otros combustibles alternativos como el hidrógeno, que requiere almacenamiento a alta presión o a temperaturas extremadamente bajas. La capacidad del metanol, que es líquido y estable a temperatura ambiente, para ser transportado y almacenado, facilita su integración en dispositivos de consumo y equipos de energía portátil, así como en infraestructuras de transporte actuales, diseñadas y preparadas para trabajar con productos y combustibles líquidos como la gasolina.[11]

En la industria marítima, el metanol también se ha posicionado como una alternativa eficaz a los combustibles tradicionales, que a menudo son altamente contaminantes. La necesidad de cumplir con regulaciones ambientales más estrictas, como las impuestas por la Organización Marítima Internacional (OMI) para la reducción de emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno, ha impulsado la búsqueda de alternativas más limpias. Al contrario que los productos derivados del petróleo, que suelen contener contaminantes como el azufre, el metanol (especialmente el metanol verde) ofrece una combustión más limpia y propone una solución atractiva para los operadores de grandes buques. Su uso en la industria marítima no solo reduce las emisiones contaminantes, sino que también tiene el potencial de disminuir los costes operativos asociados con el cumplimiento de las normativas ambientales. Además, gracias a la expansión de la infraestructura para la

FERNANDO TEMPRANO

El metanol producido a partir de fuentes renovables, como residuos, biomasa o CO2 es una materia prima para la industria química y un combustible con interés creciente por su sostenibilidad. Además, puede ayudar a mejorar la seguridad energética europea al reducir las importaciones de energía y tiene una integración inmediata y fácil con las infraestructuras de transporte y distribución.
(...)

distribución y almacenamiento de metanol, la adopción en el sector marítimo se está acelerando en los últimos años.[12] En 2023, Ørsted comenzó la construcción de su planta FlagshipONE en el norte de Suecia, que producirá 50.000 toneladas de metanol verde al año a partir de 2025 para abastecer a una flota global de barcos impulsados.[13] Y ese mismo año la compañía marítima canadiense Waterfront Shipping anunció que había realizado el primer viaje transatlántico con cero emisiones netas del mundo, utilizando metanol producido a partir de hidrógeno verde como combustible neutro en carbono.[14]

La generación de electricidad es otra área donde el metanol ha demostrado un gran potencial. Aunque todavía en fase de desarrollo, el metanol puede utilizarse en turbinas de gas y motores de combustión para la producción de energía eléctrica. La capacidad del metanol para ser utilizado en estos sistemas de generación de energía ofrece una alternativa interesante a los combustibles fósiles tradicionales, especialmente en aplicaciones donde la reducción de emisiones es crucial. Primero, porque la eficiencia de la combustión del metanol es superior a la de la mayoría de los combustibles fósiles y, segundo, porque el metanol puede ser producido de manera sostenible. Además, es posible capturar el dióxido de carbono emitido durante la combustión de metanol y volver a reciclarlo para producir metanol de nuevo, un ejemplo óptimo de economía circular y sin residuos.[15] En China, por ejemplo, la utilización del metanol como combustible ha crecido un 25% al año desde 2000 y es una de las grandes apuestas del Gobierno chino para conseguir sus objetivos de neutralidad climática antes de 2060.[16] La investigación y desarrollo en tecnologías de producción, almacenamiento y uso del metanol serán cruciales para aprovechar sus ventajas y superar los desafíos actuales. En conjunto, estas aplicaciones demuestran que el metanol no solo tiene el potencial de mejorar la eficiencia y reducir las emisiones en diversos sectores, sino que también puede desempeñar un papel importante en la transición hacia un futuro energético más sostenible.

La industria química actual produce miles, millones de productos distintos (plásticos, materiales, medicamentos, aditivos) a partir de unos pocos bloques sencillos, a menudo derivados de combustibles fósiles y recursos finitos. Entre ellos está el metanol, una pieza clave en el juego de Lego de los químicos e ingenieros, fundamental tanto por sus usos como disolvente como por sus aplicaciones en la síntesis de otros productos clave. Por ejemplo, el metanol sirve como un importante intermediario en la producción de formaldehído, otro de estos compuestos químicos "base" para la preparación de tantos otros productos. El formaldehído se obtiene a través de la oxidación del metanol en presencia de un catalizador, generalmente un óxido metálico, y tiene aplicaciones extensas en la industria de fabricación de resinas como la melanina, muy popular en la producción de materiales de construcción, muebles y acabados. Las resinas derivadas del formaldehído también son cruciales en la fabricación de adhesivos, recubrimientos y productos de papel. Su capacidad para reaccionar con otras sustancias y formar polímeros lo convierte en un componente indispensable para numerosos productos industriales y plásticos.

En este sentido, es clave identificar las oportunidades del metanol verde como una alternativa más sostenible al metanol fósil. Gracias a la síntesis sostenible de metanol, podríamos recortar la dependencia de la industria química en los productos derivados del petróleo y ofrecer unos productos de idéntica calidad y durabilidad, pero mucho más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. A pesar de que producir metanol verde todavía es más caro que producir metanol a partir de fuentes fósiles, hay algunos estudios de grandes entidades financieras como ING que sugieren que los consumidores apenas notarían el cambio de las materias primas en el precio de productos finales como una botella de plástico (que se incrementaría aproximadamente un 2%) o un automóvil (cuyo precio sería entre un 0,5% y un 1% más caro, a pesar de utilizar mucho más plástico, proporcionalmente, el incremento sería menor).[17] Otro producto clave derivado del metanol es el ácido acético, que se produce mediante la carbonilación del metanol en presencia de un catalizador de rutenio o iridio. El ácido acético (que también es el "principio activo" del vinagre, producto de la oxidación del etanol del vino y la sidra) es un compuesto químico vital en la industria, utilizado principalmente en la producción de acetato de vinilo, que a su vez se utiliza para fabricar plásticos y fibras sintéticas. También se emplea en la producción de ácido tereftálico, que es un precursor esencial para la fabricación de poliésteres como el PET. Además, el ácido acético encuentra aplicaciones en la industria alimentaria como conservante y en la producción de productos farmacéuticos y cosméticos. De nuevo, una transición a metanol verde tendría como consecuencia la descarbonización de estas industrias, algo especialmente importante en el caso de los plásticos y

FERNANDO TEMPRANO

|

(...)

Es percibido por sus características como un combustible atractivo para el transporte marítimo, con capacidad para ayudarle a cumplir la exigente regulación de emisiones del sector y probablemente en el futuro como una alternativa potencial al diésel o la gasolina en los vehículos de combustión. Esto exigiría desarrollos innovadores en la industria europea de automoción para adaptar los motores a las características del metanol.

los productos farmacéuticos, dado que tenemos que encontrar rutas alternativas para producirlos que no dependan del petróleo para garantizar su viabilidad a largo plazo.[18] El metanol también es un producto clave en la producción de otros plásticos y polímeros, como el polimetilmetacrilato (PMMA), comúnmente conocido como acrílico, utilizado en una amplia gama de aplicaciones, desde lentes y pantallas hasta materiales de construcción y señales de tráfico. Además, el metanol es esencial en la fabricación de productos químicos especializados, como los clorometanos, generalmente utilizados como disolventes en la industria, y los ésteres, importantes en la producción de saborizantes, fragancias y plásticos.[19]

En resumen, el metanol es una materia prima esencial en la industria química,[20] fundamental para cientos de reacciones químicas y la síntesis de productos tan diferentes como combustibles, plásticos, aditivos y medicamentos. A medida que la demanda de productos químicos y materiales siga creciendo (y que la dependencia en productos fósiles disminuya), el metanol verde[21] desempeñará un papel fundamental en el desarrollo y la fabricación de productos industriales de forma más sostenible. La apuesta por el metanol verde a través de tecnologías innovadoras y políticas que favorezcan su producción será crucial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y diversificar tanto nuestras fuentes de energía como la dependencia de diferentes materias primas industriales. Para el Foro Económico Mundial, a pesar de todas las desventajas que podría tener el escalado de las tecnologías de producción, el metanol es el combustible del futuro que todos pasan por alto. Porque no es solo un combustible, sino una pieza clave de la descarbonización de la industria química que puede reducir las emisiones hasta un 95%. Sin duda, una alternativa muy prometedora.[22]

Ventajas y desventajas del metanol y del metanol renovable

Fuente: IRENA / Methanol Institute

VENTAJAS

Se puede producir a escala industrial a partir de diversas materias primas que contienen carbono. Gas natural y carbón hoy; biomasa, residuos sólidos y CO_2 + H_2, mañana

Ya se utiliza para producir cientos de productos químicos industriales y de consumo cotidianos

El metanol es un líquido en condiciones atmosféricas. Esto hace que sea fácil de almacenar, transportar y distribuir por barco, oleoducto, camión y ferrocarril

Solo se necesita una modificación relativamente económica y menor de la infraestructura petrolera existente para el almacenamiento y la distribución del metanol

Combustible versátil para motores de combustión interna, sistemas híbridos (combustible/eléctricos) y celdas de combustible, motores de turbina, cocinas y calderas

Potencial portador de hidrógeno líquido

Bajas emisiones contaminantes: sin hollín (PM), sin SO_x, bajo NO_x . El metanol renovable y con bajas emisiones de carbono también reduce las emisiones de CO_2

No hay desafíos técnicos inherentes a la ampliación de la producción de metanol para satisfacer las necesidades de los sectores del transporte o la industria química

El metanol es fácilmente biodegradable

CONTRAS

La producción de metanol renovable sigue siendo más cara que la del metanol fósil

Es necesario ampliar la producción de metanol renovable

Competencia por materias primas renovables (biomasa, CO_2, energía renovable, hidrógeno verde) con otras alternativas renovables

El metanol renovable requiere apoyo a la inversión, políticas públicas tecnológicamente neutrales y eliminación de barreras para acceder a electricidad renovable asequible, CO_2 y materias primas de biomasa

Es necesario ampliar los estándares de combustible para el metanol para permitir un uso más amplio en más países y para más aplicaciones

Solo tiene aproximadamente la mitad de la densidad energética volumétrica de la gasolina y el combustible diésel

Es corrosivo para algunos metales e incompatible con algunos plásticos y materiales

Es altamente inflamable y puede provocar una explosión si se manipula de forma inadecuada, como la gasolina, el etanol o el hidrógeno

Tóxico; puede ser letal si se ingiere

Alternativa energética en busca de mercado

EN ACCIÓN

En julio de 2024, Methanol Institute contabilizaba 170 proyectos de producción metanol renovable a nivel mundial, frente a los 90 de dos años antes,[23] con una capacidad de generación total prevista de 20,87 millones de toneladas métricas en 2027 (apenas se llegó a 0,2 millones de toneladas en 2021) y 26,72 millones de toneladas en 2029. En el caso del e-metanol, las estimaciones le atribuían 12,63 millones de toneladas en 2027 y 16,43 millones de toneladas en 2029; mientras que los proyectos de biometanol prevén alcanzar las 8,24 millones de toneladas y 10,29 millones de toneladas, respectivamente, durante los mismos períodos.[24] El biometanol (metanol verde) se produce a partir de biomasa: residuos y subproductos de la silvicultura y la agricultura, como el licor negro de la industria de pulpa y papel, biogás de vertederos, aguas residuales y residuos sólidos urbanos. El metanol electrónico (e-metanol, verde o azul) se obtiene combinando el CO2 capturado con hidrógeno procedente de electricidad renovable. En comparación con los combustibles convencionales, el metanol renovable reduce las emisiones de dióxido de carbono hasta en un 95%, rebaja las de óxido de nitrógeno hasta en un 80% y elimina por completo las de óxido de azufre y partículas, de ahí que se convierta en un objeto de deseo para la transición energética sostenible.

Entre las razones para vaticinar un protagonismo creciente del metanol renovable en el sector energético global se encuentran la ampliación de las capacidades de generación de energías verdes, clave para abaratar la producción, ya que la electricidad representa entre un 40% y un 70% de los costes; la optimización de la cadena de conversión, gracias al desarrollo de catalizadores avanzados basados en cobre y zinc, para la hidrogenación de CO2, y especialmente de electrolizadores avanzados; el aumento notable en el número de estrategias nacionales de hidrógeno; y la mayor aceptación y despliegue de la captura, utilización y almacenamiento de carbono. En este último caso, un problema relevante para los productores de e-metanol sigue siendo la adquisición y el transporte de CO2: si una planta de e-metanol no está conectada a un conducto de distribución, debe afrontar desafíos logísticos con costes complejos, con el agravante de que el transporte implica aumentar las emisiones en el ciclo de vida del e-metanol producido. En Estados Unidos se trabaja, por eso, sobre la base de generar sinergias entre la producción de e-metanol y la de etanol. Los procesos capaces de generar un suministro constante de CO2 biogénico altamente concentrado y de bajo coste se consideran socios naturales en la creación de e-metanol.[25]

En definitiva, sólo las dudas que todavía genera el potencial de esta tecnología para escalar siguen contribuyendo a enfriar las expectativas que despierta en muchos sectores. En las condiciones actuales del mercado, la producción de e-metanol está lejos de ser competitiva frente a la producción de metanol convencional a partir de combustibles fósiles (gas natural en el 65% de los casos y carbón mediante procesos de gasificación[26] en el 35% restante). El líder mundial en producción de metanol, el grupo norteamericano Methanex, se movió en 2023 en torno a un precio medio de 333 dólares por tonelada, en comparación con los 397 dólares por tonelada de 2022. Un estudio llevado a cabo por investigadores italianos estima que ni siquiera a 450 euros la tonelada resulta rentable explotar una instalación de e-metanol, de modo que su valor actual neto (VAN) sería negativo en aproximadamente 21 millones de euros. Para probarlo, diseñaron una planta capaz de producir 500 kg/h de metanol renovable a partir de hidrógeno verde y dióxido de carbono capturado. El coste nivelado final era de 960 euros la tonelada (aproximadamente 175 euros el MWh), más del doble que el precio del metanol en el mercado internacional (450 euros/t) y tres veces superior al precio de venta medio alcanzado por Methanex.[27] A largo plazo, en torno a 2035, creen que sería posible alcanzar la rentabilidad si se combina un coste del metanol renovable un 25% superior, una reducción del 15% del coste de capital del electrolizador y un abaratamiento del 25-30% de la electricidad.

Hasta ahora eso sólo ha sucedido debido a determinadas circunstancias geopolíticas recientes. Según las cuentas de S&P Global Commodity Insights, el metanol (básicamente convencional) se comercializó a precios más bajos, en dólares por tonelada, que el MGO (gasóleo marino), el HFO (fueló-

Políticas clave de demanda energética para la industria por región

Fuente: IEA

lelo pesado) y el GNL (gas natural licuado) en el centro de abastecimiento de Róterdam entre noviembre de 2021 y marzo de 2024. Los precios del gas natural se dispararon hacia finales de 2021, en medio de una escasez de suministro antes del invierno que los expertos atribuyen a una estrategia prebélica de Rusia,[28] y después de la invasión rusa en Ucrania en febrero de 2022 se sucedieron diversos picos. Ese encarecimiento afectó al GNL, pero también ejerció una presión al alza sobre el metanol (no renovable), ya que la mayor parte se fabrica a partir de gas natural. Entre 2023 y 2024, los patrones comerciales de transporte de metanol se vieron alterados por las condiciones en el Canal de Panamá, cuyo tráfico se vio afectado por motivos naturales, y en el Canal de Suez, inmerso en la inestabilidad de Oriente Próximo. Los nuevos patrones comerciales permitieron, por ejemplo, disfrutar a Europa de un mejor abastecimiento desde las cuencas Atlánticas, pero en última instancia amenazaban con impulsar aún más los ajustes en el mercado del metanol e incluso por comenzar a influir en los precios.[29]

El futuro del metanol renovable tiene uno de sus grandes campos de expansión en el mar. La Organización Marítima Internacional (OMI) se ha comprometido a reducir las emisiones del transporte marítimo al menos en un 70% hasta 2040, lo que refuerza a este combustible verde como una alternativa de descarbonización indudable para el sector. En 2023 sólo había 27 buques en servicio con capacidad para utilizar metanol, pero ese año se realizaron 143 pedidos de construcción nuevos. Si se suman a los pedidos anteriores, la flota con capacidad para metanol podría elevarse hasta las 227 unidades, según datos de Clarksons. Methanex eleva esa cifra a más de 260 buques nuevos de metanol encargados a los astilleros del mundo, lo que supondría que, por primera vez, el volumen de pedidos sería superior al de buques de GNL.[30] Según Platts Analytics, al menos 228 buques de combustible dual de metanol estaban en cartera de pedidos en el primer semestre de 2024 para ser entregados en 2028.

En paralelo a estos movimientos, otra de las tendencias que definieron 2023 fue el aumento de la renovación de motores de metanol. La cartera de pedidos se ha incrementado mucho más allá de las expectativas. Al cierre de ese año, se habían vendido 192 motores de dos tiempos con una potencia de salida de entre 8 MW y 80 MW en el mercado marítimo. La mayoría de los pedidos fueron para portacontenedores grandes que requieren de tres a cinco motores auxiliares. Por ejemplo, el primer portacontenedores neutral en carbono del mundo, el Laura Maersk, opera con un motor de dos tiempos MAN Energy Solution para propulsión y dos motores de cuatro tiempos de tamaño mediano HiMSEN. Por su parte, HD Hyundai ha recibido pedidos para producir 177 unidades de motor impulsadas por metanol destinadas a 42 buques. Los propulsores de metano no sólo se fabrican

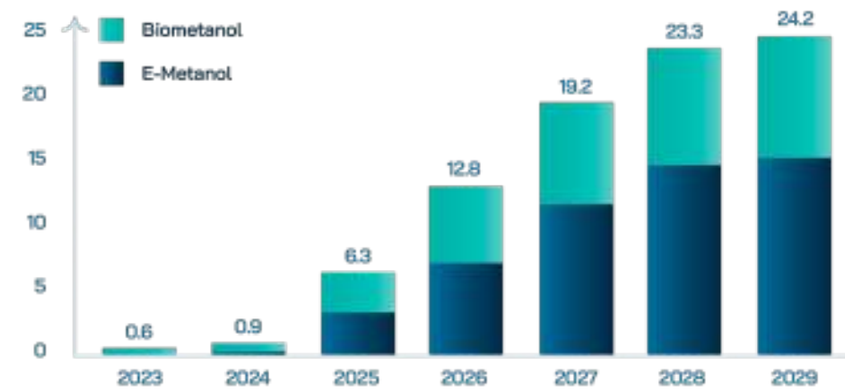
para los buques nuevos: varias compañías navieras de contenedores quieren incorporarlos para modernizar los buques ya existentes. Maersk seleccionó el astillero Zhoushan Xinya, al sur de Shanghái, para que el Maersk Halifax de 15.282 TEU pudiera operar con metanol, la primera de las 11 modernizaciones de motores que tenía previsto realizar.[31]

La Autoridad Marítima y Portuaria de Singapur, el mayor centro de abastecimiento de combustible marítimo del mundo, ha solicitado propuestas para llevar a cabo un suministro estable de metanol con bajas emisiones de carbono a partir de 2025. El país prepara la aprobación de los estándares nacionales para el suministro de metanol como combustible marino.[32] Su objetivo es consolidarse como un punto estratégico en dos de los corredores verdes más grandes del mundo, el Corredor Verde del Puerto de Róterdam a Singapur y el Corredor Verde de la Alianza de la Seda, que se extiende desde Shanghái hasta Singapur. En Japón, Maersk ha firmado un memorando de entendimiento con la ciudad de Yokohama y Mitsubishi Gas Chemical para el desarrollo de una infraestructura de abastecimiento de metanol ecológico en puerto. En la UE, Equinor está suministrando biometanol desde Noruega al buque Laura Maersk, y OCI Global tenía previsto hacer lo propio a partir de mediados de 2024 con Xpress Feeder Lines para su flota. En la COP28, la asociación EU-Catalyst, formada por la Comisión Europea, Breakthrough Energy Catalyst y el Banco Europeo de Inversiones, anunció su apoyo al proyecto FlagshipONE de Ørsted, la mayor planta de metanol electrónico de Europa.
La transición energética hace extraños compañeros: Evergreen de Taiwán ha firmado un memorando de entendimiento con el Puerto de Shanghái para utilizar su búnker de metanol ecológico.

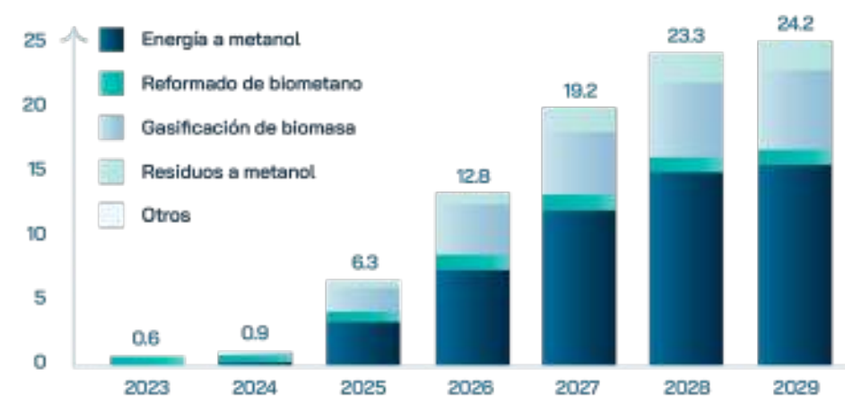
No obstante, son numerosas las llamadas a no disparar las expectativas. No se espera que los combustibles marítimos renovables basados en hidrógeno, como el amoníaco y el metanol, sean más competitivos en precio que los fósiles hasta después de 2040.[33] Y debido a su densidad y a su menor poder calorífico,

Capacidad de producción prevista de metanol renovable

Tipos de metanol renovable, Mt



Sistema de producción, Mt



Fuente: Gena / Methanol Institute

HÉCTOR PEREA

El metanol verde podría ofrecer una solución estratégica para sectores que históricamente han sido difíciles de descarbonizar, como el transporte marítimo o la industria química.

La clave del éxito para la adopción del metanol verde radica en la combinación de inversiones estratégicas en infraestructura, el desarrollo de las tecnologías actuales, y el apoyo gubernamental a través de políticas e incentivos que faciliten su producción y uso en sectores clave.

los tanques de combustible de metanol son aproximadamente 2,5 veces más grandes que los tanques de petróleo para el mismo contenido energético.[34] La producción de metanol verde era ciertamente baja en 2021, menos de 0,2 millones de toneladas anuales, frente a los 98 millones de toneladas de metanol convencional elaborado a partir de combustibles fósiles,[35] cuya producción no sólo no se va a detener, sino que podría alcanzar los 500 millones de toneladas en 2050. Aun así, liberaría 1,5 gigatoneladas de dióxido de carbono al año, según estimaciones de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA),[36] lo que lo sigue manteniendo como una alternativa para reducir el cambio climático. El precio del e-metanol será muy sensible al de la energía necesaria para producir hidrogeno verde, que representa el 77% del coste total,[37] principalmente por el coste de la electricidad y por los costes operativos de la planta de electrolisis. Según los cálculos de la Plataforma Europea de Tecnología e Innovación de Redes Inteligentes para la Transición Energética (ETIP SNET)[38] de la Comisión Europea, el precio mínimo del hidrógeno renovable no bajará de los 2,5 euros por kilogramo, por lo que será necesario aprobar subsidios para la fabricación combustibles sintéticos de bajas emisiones como el e-metanol.

Europa alberga a cuatro de las principales compañías marítimas (Maersk, MSC, CMA CGM, Hapag Lloyd), que representan el 52% del mercado a nivel mundial, de modo que es un actor clave en todo este proceso. Varias de ellas están recurriendo al metanol como combustible para la descarbonización. No obstante, asociaciones como CleanTech for Europe vienen advirtiendo de que sólo tendrá éxito si se beneficia de un marco regulatorio claro y de una cadena de valor funcional, que aporte certezas a largo plazo y sea capaz de atraer inversiones de más de 30 años.[39] Los dos sistemas de fijación de precios de las emisiones de CO2 establecidos por la Unión Europea para el transporte marítimo se basan en el régimen de comercio de derechos de emisión (ETS) y el mecanismo FuelEU Maritime, que entra en vigor en 2025.[40] Ambos modelos están condicionando las decisiones estratégicas de las grandes compañías. En las circunstancias actuales, por ejemplo, se estima que diez portacontenedores podrían evitar el pago de alrededor de 277 millones de euros en sanciones marítimas según el mecanismo FuelEU durante cinco años (2030-2034) si unen a su flota un solo buque propulsado con e-metanol. Se trata de un ahorro claramente superior a lo que costaría construirlo.

Más allá del transporte marítimo, el sector químico tradicional representa aproximadamente el 50% de la demanda mundial de metanol, por encima de las aplicaciones relacionadas con la energía y el combustible, con el 30%. El mercado del metanol alcanzó aproximadamente los 91 millones de toneladas en 2023, impulsado principalmente por el crecimiento de la demanda en China, cuyas importaciones alcanzaron el récord histórico de 14 millones de toneladas, gracias a la recuperación del sector químico y a los altos niveles de uso que está consiguiendo como combustible para vehículos.[41] Se puede mezclar metanol con gasolina en pequeñas cantidades para vehículos existentes y en alta proporción para otros propulsados con combustible flexible o directamente dedicados al metanol. El rango de las mezclas oscila entre el 5% al 100% ('M5' a 'M100'). Unos 30.000 taxis y automóviles de pasajeros son ya híbridos de metanol y 4.000 camiones pesados funcionan con combustible M100 en China. En total, suponen alrededor de un millón de toneladas de demanda anual.[42]

El Gobierno chino está alentando esta tendencia: aprobó en 2023 tres estándares nacionales sobre combustible de metanol fundamental y al cierre de ese año había 140 estaciones de servicio activas. El fabricante de automóviles Geely, uno de los principales impulsores de esta tecnología en el país, pretende desarrollar un ecosistema basado en metanol en la ciudad de Handan a través de su marca Farizon Auto. Planea utilizar energías renovables, eólica y solar, y alcanzar una capacidad de producción de, precisamente, un millón de toneladas.[43] El metanol alimenta hoy en China calderas industriales, hornos, calefacción doméstica, grupos electrógenos, sistemas de celdas de combustible y, sobre todo, cocinas, el componente total de demanda más grande del país, con más del 50%. No deja de ser significativo que el pebetero de los Juegos Asiáticos de 2023 ardiera con metanol producido en la provincia de Henan, en una nueva planta financiada también por Geely que utiliza tecnología de la islandesa Carbon Recycling International. Es la primera instalación de su tipo en el mundo, capaz de producir a escala comercial a partir de dióxido de carbono y gases de hidrógeno procedentes de desechos.

Para entender el interés estratégico de China por el metanol hay que tener en cuenta que, en los próximos 15 años, hasta el 80% del suministro de

petróleo en el gigante asiático podría tener que ser importado, lo que está incentivando la búsqueda de alternativas en el país... y fuera de él. Con motivo de la celebración de la Tercera Conferencia de la Iniciativa de la Franja y la Ruta (BRI) en Pekín, funcionarios chinos y nigerianos anunciaron la creación de una planta de metanol al este de Nigeria; y China Road and Bridge Corporation y la empresa nigeriana BRASS Petrochemical colaborarán en la construcción de un puerto, con una capacidad prevista de dos millones de toneladas de metanol con destino a China.[44] Son numerosas las instalaciones de producción de metanol promovidas por el gigante asiático en los países BRI para garantizar un suministro estable, en su mayoría basadas en gas natural y carbón como materia prima. En sus acuerdos con otros Estados, Pekín aprovecha también para asociarse con instituciones de investigación y gobiernos locales para desarrollar tecnologías avanzadas de producción y utilización de metanol. A nivel mundial, de los 30 puertos que ahora pueden ofrecer abastecimiento a gran escala (*bunkering*) de metanol, cinco están en China.

El papel de Asia en la gestión de la electrificación de la industria será clave para conseguir los objetivos de la lucha contra el cambio climático a nivel global. En un escenario de política estable, que todavía está por ver, la producción de todos los principales materiales industriales aumentará hasta 2030, incluidos el etileno (un 27% más), el metanol (17%), el aluminio (13%) y el papel (12%), así como el acero y el amoníaco (10%) y el cemento (8%). Ese crecimiento se producirá principalmente en los países en desarrollo de Asia.[45] En este escenario de creciente presión de la demanda en los mercados mundiales, entidades como Methanol Institute denuncian que en Europa los inversores, productores y partes interesadas en el mercado de combustibles alternativos se enfrentan a una incertidumbre considerable debido a la falta de normas armonizadas y de definiciones de lo que constituye un combustible con bajas emisiones de carbono.[46] Pese a que, desde julio de 2023, los biocombustibles avanzados, incluido el metanol, están reconocidos como RFNBO (combustibles renovables de origen no biológico), la propuesta de aplicación de la Union Database for Biofuels (UDB) por parte de la Comisión Europea excluye la certificación automática del biometano y de los biocombustibles basados en biometano, como el biometanol, cuando son producidos mediante una cadena de custodia con balance de masas a partir de redes de gas no pertenecientes a la UE. Los productores advierten del riesgo de que esta medida cree una barrera comercial que impida la importación de biometano y biometanol a la UE, y sostienen que podría tener importantes implicaciones en la descarbonización del transporte marítimo intraeuropeo e internacional. Además, podría provocar que dichos combustibles, producidos fuera de la UE, no sean certificados con arreglo a los requisitos de la Directiva sobre energías renovables II (REDII),

de modo que no se contabilizarían en relación con el cumplimiento de los objetivos de reducción de la intensidad de carbono de FuelEU Maritime.[47] Y la revisión de la Directiva sobre energías renovables (RED III) va un paso más allá y propone pasar de un objetivo del 32% a al menos el 40% de fuentes de energía renovables en la combinación energética general de la UE en 2030. Junto a ello, Methanol Institute pide a Bruselas que la legislación europea reconozca las pruebas de almacenamiento de CO2 emitidas por terceros países.

Proyectos de producción de metanol verde por país

Fuente: The Methanol Institute

Las renovables impulsan los brotes verdes del metanol

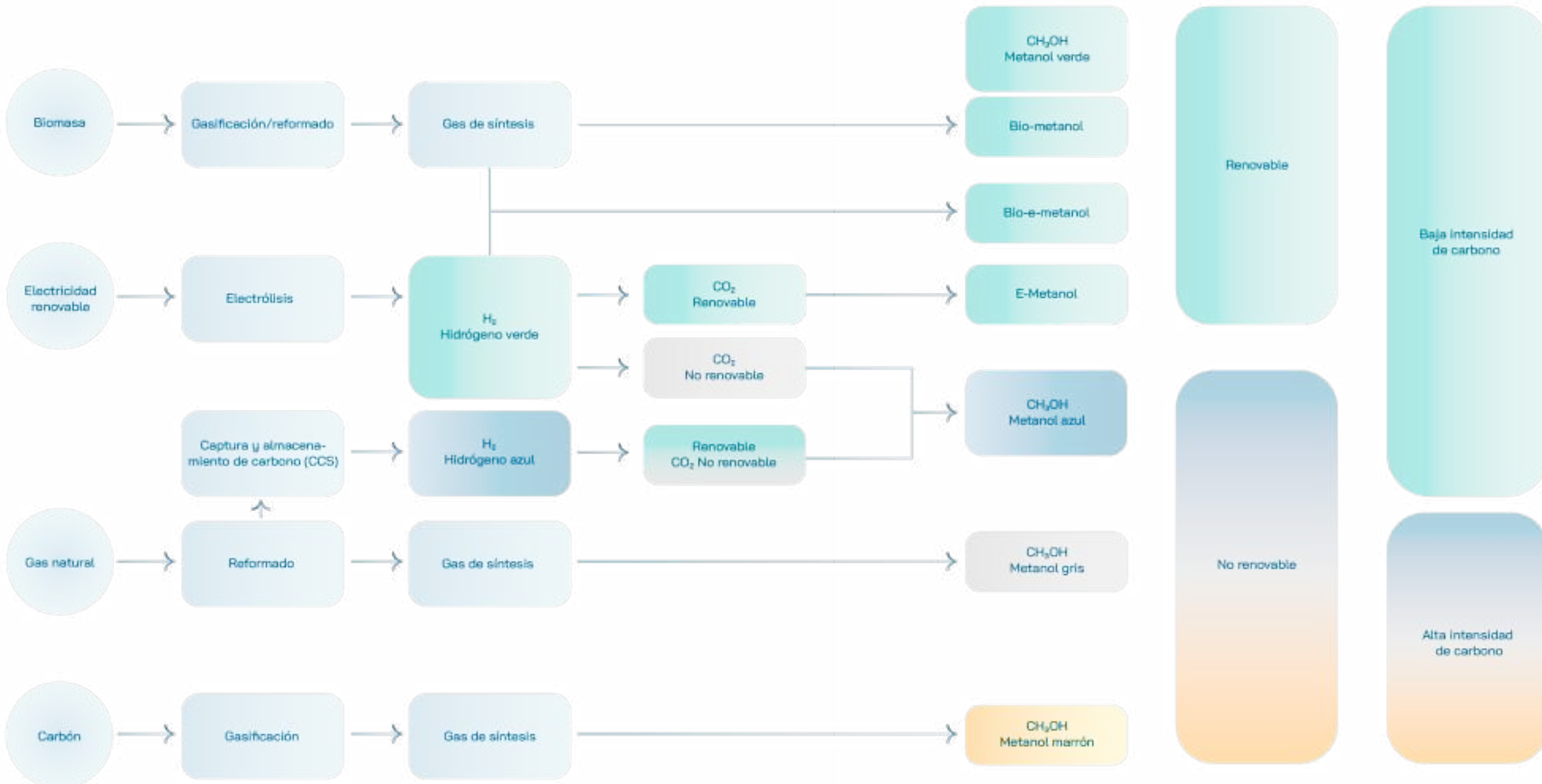
ESPAÑA

De entre las 239 solicitudes presentadas a la tercera convocatoria del Fondo de Innovación, que incluye proyectos de descarbonización industrial y a gran escala,[48] la Comisión Europea seleccionó 41 propuestas[49] a las que destinará 3.600 millones de euros para introducir en el mercado tecnologías innovadoras en sectores de alto consumo energético, hidrógeno, energías renovables y fabricación de componentes para el almacenamiento de energía y las energías renovables. Uno de los proyectos seleccionados es GREEN MEIGA, coordinado por Iberdrola, que plantea un enfoque tecnológico innovador e integrado para la producción de e-metanol. La iniciativa consiste, por un lado, en una planta integrada con un sistema de producción de hidrógeno híbrido, que comprende sistemas de coelectrólisis de celda electrolítica de óxido sólido (SOEC), membrana de intercambio de protones (PEM) y alcalina (alpha-alpha). Junto a ello, prevé un sistema integrado de producción de e-metanol, y un sistema avanzado de captura de CO2 que integra tecnologías basadas en enzimas y de captura directa de aire.
En otra de las ideas seleccionadas participa la también española Forestal del Atlántico. Se trata del proyecto TRISKELION y tiene como objetivo producir metanol verde también a partir de hidrógeno y CO2 capturado. El hidrógeno se produce mediante electrólisis con electricidad procedente de fuentes renovables adicionales, ya que contempla la apertura de un parque eólico en las inmediaciones de las instalaciones. Y el CO2 se captura a partir de una planta de cogeneración existente. El proyecto también producirá oxígeno líquido verde a través de un sistema de licuefacción de oxígeno y almacenamiento de oxígeno líquido.

Son dos de las iniciativas que han puesto a España en el mapa de la producción de metanol verde en Europa y en el mundo, especialmente desde que se produjo el anuncio de la alianza entre la empresa energética Cepsa y la filial del gigante del transporte marítimo mundial Maersk C2X para construir una planta de metanol ecológico en Huelva, con un coste estimado de hasta 1.100 millones de dólares. Una vez finalizada, la planta producirá 300.000 toneladas métricas de metanol ecológico al año, lo que la convierte en una de las mayores instalaciones de su tipo en Europa. La Autoridad Portuaria de Huelva ya ha concedido la autorización administrativa a la empresa Phoenix X Spain, filial del grupo danés, para construir y explotar la planta de metanol verde en la zona portuaria con una concesión de casi medio millón de metros cuadrados de dominio público. El de Cepsa no es el único proyecto anunciado en la provincia andaluza. El Grupo Ansasol, especializado en hidrógeno verde, asegura que la planta de metanol verde que planea también en el Puerto de Huelva será la mayor de Europa. Se trata del proyecto MetGreenPort, comenzará a funcionar en 2027 y producirá metanol verde utilizando hidrógeno verde generado mediante electrólisis del agua, para lo cual se abastecerá de energía renovable, y dióxido de carbono capturado de industrias circundantes.

La dinámica se extiende a otros lugares del país. Repsol tiene previsto poner en actividad en 2028 una planta de biometanol en el municipio catalán de El Morell con capacidad para 237.000 toneladas. En el municipio leonés de La Robla, por su parte, las compañías españolas Reolum y Tresca Ingeniería junto con el fondo de inversión Incus pondrán en marcha el proyecto La Robla Green que incluye una planta de generación de energía a partir de biomasa, Roblum, y una planta de e-metanol. El complejo H2OSSA, impulsado por ETFuels prevé alcanzar las 100.000 toneladas de biometanol a partir de 2028, un volumen similar al que espera conseguir HyFive en su planta de Gijón en 2027.

Rutas de producción de metanol



Fuente: IRENA / Methanol Institute

Relación de notas

[1] Andrew Turley. "Methanol". Chemistry World. Publicado el 24/06/2015, consultado el 20/07/2024.

[2] IRENA (2021). "Renewable methanol". Consultado el 20/07/2024.

[3] Methanol Institute (2022). "The carbon footprint of methanol". Consultado el 20/07/2024.

[4] Johnson Matthey (2020). "Green methanol". Consultado el 20/07/2024.

[5] H Guzmán et al. Chemical Engineering Journal, 2021, 417, 127973, DOI: 10.1016/j.cej.2020.127973

[6] Generandi (2022). "Renewable methanol could be cost-competitive by 2050". Consultado el 20/07/2024.

[7] National Academy of Sciences (2014). "The Nexus of Biofuels, Climate Change, and Human Health: Workshop Summary." Consultado el 20/07/2024.

[8] DOE (n.d.). "Methanol". Consultado el 20/07/2024.

[9] L. Bromberg y W.K. Cheng. "Methanol as an alternative transportation fuel in the US: Options for sustainable and/or energy-secure transportation". MIT-Batelle. Publicado el 28/11/2010, consultado el 20/07/2024.

[10] Kurina Baksh. "Why Switching to Methanol Fuel Is Better for You, Your Vehicle, and the Environment". Safeopedia. Publicado el 12/06/2024, consultado el 20/07/2024.

[11] Methanol Institute (2020). "Methanol: A Future-Proof Fuel". Consultado el 20/07/2024.

[12] IMO (2016). "Methanol as marine fuel: environmental benefits, technology readiness, and economic feasiblity". Consultado el 20/07/2024

[13] Bernd Radowitz. "Why Orsted's new green hydrogen and methanol plant in Sweden will change the energy landscape in Europe". Publicado el 26/05/2023, consultado el 20/07/2024.

[14] Leigh Collins. "Shipping firm claims first net-zero crossing of Atlantic — powered by methanol derived from hydrogen". Publicado el 01/03/2023, consultado el 20/07/2024.

[15] Methanex (n.d.). "Methanol for power generation." Consultado el 20/07/2024.

[16] Zeyi Yang. "China is betting big on another gas engine alternative: methanol cars". Publicado el 30/09/2022, consultado el 20/07/2024.

[17] Gerben Hieminga, Edse Dantuma y Coco Zhang. "How the plastics industry can function without fossil fuels – and at what cost". ING. Publicado el 09/07/2024, consultado el 20/07/2024.

[18] Jane Denny. "Biobased Acetic Acid: Making a Key Chemicals Feedstock Sustainable". Resource Wise. Publicado el 20/07/2023, consultado el 20/07/2024.

[19] The Essential Chemical Industry (n.d.). "Methanol". Consultado el 20/07/2024.

[20] Mitsubishi (n.d.). "The Many Uses of Methanol". Consultado el 20/07/2024.

[21] M Fasihi y C Breyer. Energy and Environmental Science, 2024, 17, 3503, DOI: 10.1039/D3EE02951D.

[22] Gabi Thesing. "Is green methanol the clean fuel the world is forgetting?" WEF. Publicado el 31/08/2023, consultado el 20/07/2024.

[23] "2024 Milestones", Methanol Institute, 2024

[24] https://www.methanol.org/renewable/

[25] "The Success of Synergies", Worley, 2024

[26] D. Wang, W. Meng, H. Zhou, Y. Yang, J. Xie, S. Yang, G. Li, "Novel coal-to-methanol process with near-zero carbon emission: pulverized coal gasification-integrated green hydrogen process", J. Clean. Prod., 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130500

[27] Stefano Sollai et al. "Renewable methanol production from green hydrogen and captured CO2: A techno-economic assessment", Journal of CO2 Utilization, febrero de 2023, https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102345

[28] Ignacio Urbasos, "El futuro del gas ruso en la Unión Europea", Real Instituto Elcano, marzo de 2024

[29] Cassidy Staggers, "El mercado del metanol se mantiene firme hasta 2024, en parte respaldado por las interrupciones del transporte marítimo", Argus, 2024

[30] "Annual Report 2023", Methanex, marzo de 2024

[31] "2024 Milestones", Methanol Institute, 2024

[32] "Singapore pursues low-carbon methanol development to lead maritime fuel innovation", Reccessary, 17 de abril de 2024, consultado el 31/07/2024

[33] Leigh Collins, "Hydrogen-based shipping fuels such as ammonia and methanol will not be economically viable until 2040, analyst warns", Hydrogen Insight, 27 de enero de 2023

[34] Ansuman Ghosh, "Rising interest in methanol as ship fuel", UKP&I, 7 de marzo de 203

[35] "Innovation Outlook: Renewable Methanol", IRENA / Methanol Institute, 2021

[36] Gabi Thesing, "Is green methanol the clean fuel the world is forgetting?", World Economic Forum, 31 de Agosto de 2023, consultado el 31 de julio de 2024

[37] Juan Ignacio de la Fuente Rodríguez, "El coste del metanol verde en el transporte marítimo", El Periódico de la Energía, 18 de septiembre de 2023, consultado el 31/07/2024

[38] "Hydrogen's impact on grids. Impact of hydrogen integration on power grids and energy systems", Comisión Europea, 2023, doi: 10.2833/556144

[39] "Decarbonising maritime transportation with green methanol", Cleantech for Europe, 18 de diciembre de 2023, consultado el 31/07/2024

[40] "EU carbon pricing brings new pressures – and new plays – to maritime", Lloyd's Register, 29 de marzo de 2023, consultado el 01/08/2024

[41] "Here's Why China is Betting Big on Methanol", IEF, 24 de febrero de 2023

[42] "Annual Report 2023", Methanex, marzo de 2024

[43] "Geely to develop green methanol for commercial vehicles", Hydrogen Today, 23 de enero de 2024

[44] Lolade Aluko, "China's potential methanol investment in Nigeria and why it is significant", Iluminem, 7 de noviembre de 2023

[45] "World Energy Outlook 2023", IEA, octubre de 2023

[46] "Methanol Institute's recommendations on Article 9", Methanol Institute, 2024

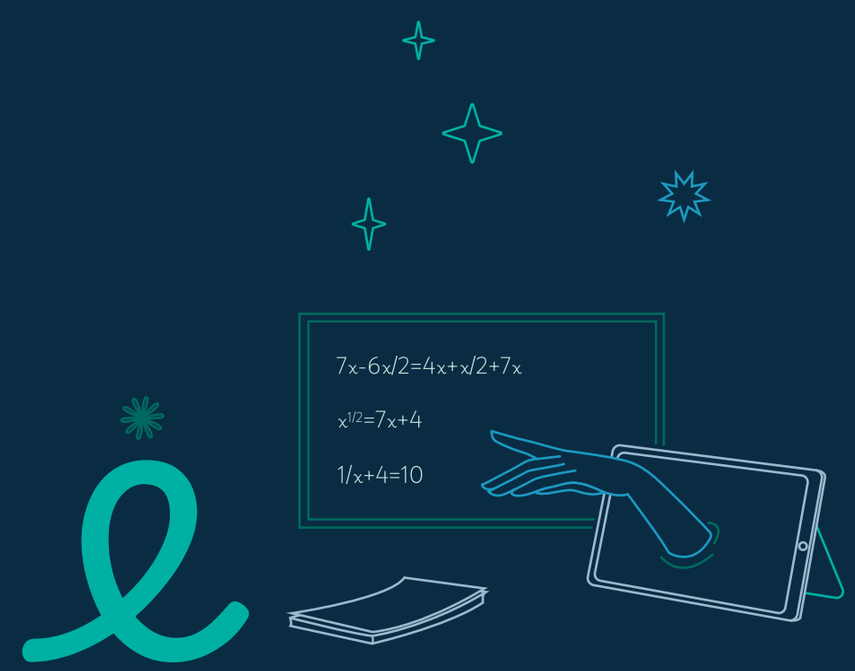
[47] "Recognizing biomethane and biomethane-based fuels produced through mass balancing in non-EU gas grids under the Union Database", SEA-LNG, Methanol Institute, 17 de abril de 2024

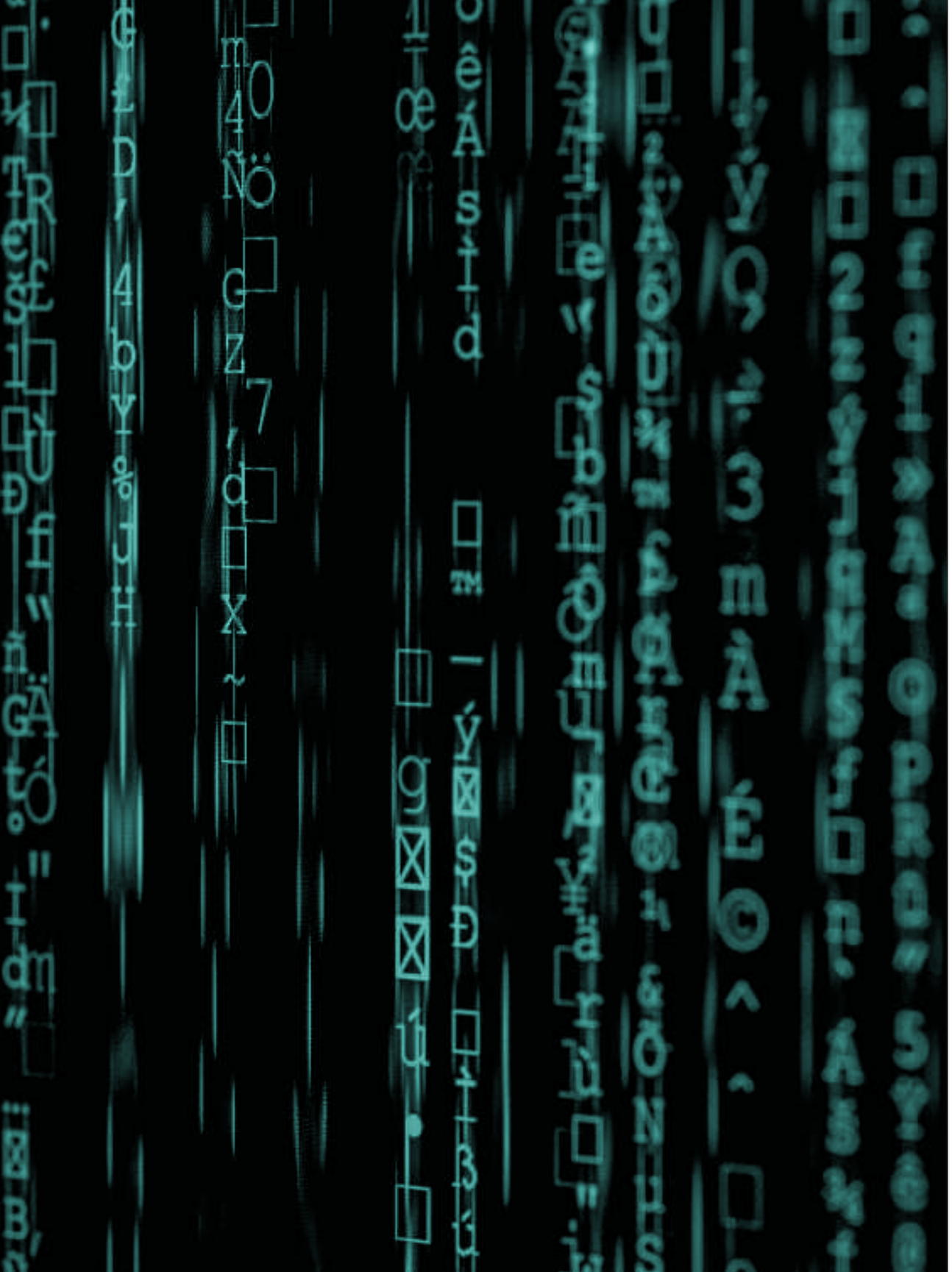
[48] https://industrydecarbonization.com/news/eu-innovation-fund-oxy-fuel-ccs-e-methanol-and-more.html

[49] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_3787

10

Educar con inteligencia artificial





Educar con inteligencia artificial

La llegada y popularización de la inteligencia artificial (IA) y los modelos de lenguaje grande (LLM, por sus siglas en inglés) ha transformado diferentes sectores de nuestra sociedad. De hecho, tanto en anteriores ediciones de INTEC como en otros capítulos de esta misma memoria, hemos analizado el potencial de la IA para mejorar tecnologías muy diversas. Y queremos dedicar este capítulo a las aplicaciones y mejoras que pueden aportar estos avances a la educación. Además de proporcionar a los estudiantes nuevas herramientas digitales y métodos para mejorar tanto la enseñanza como el aprendizaje, la IA puede permitir que la educación se vuelva todavía más inclusiva, accesible y equitativa.

Las oportunidades de la IA en educación

POR DENTRO

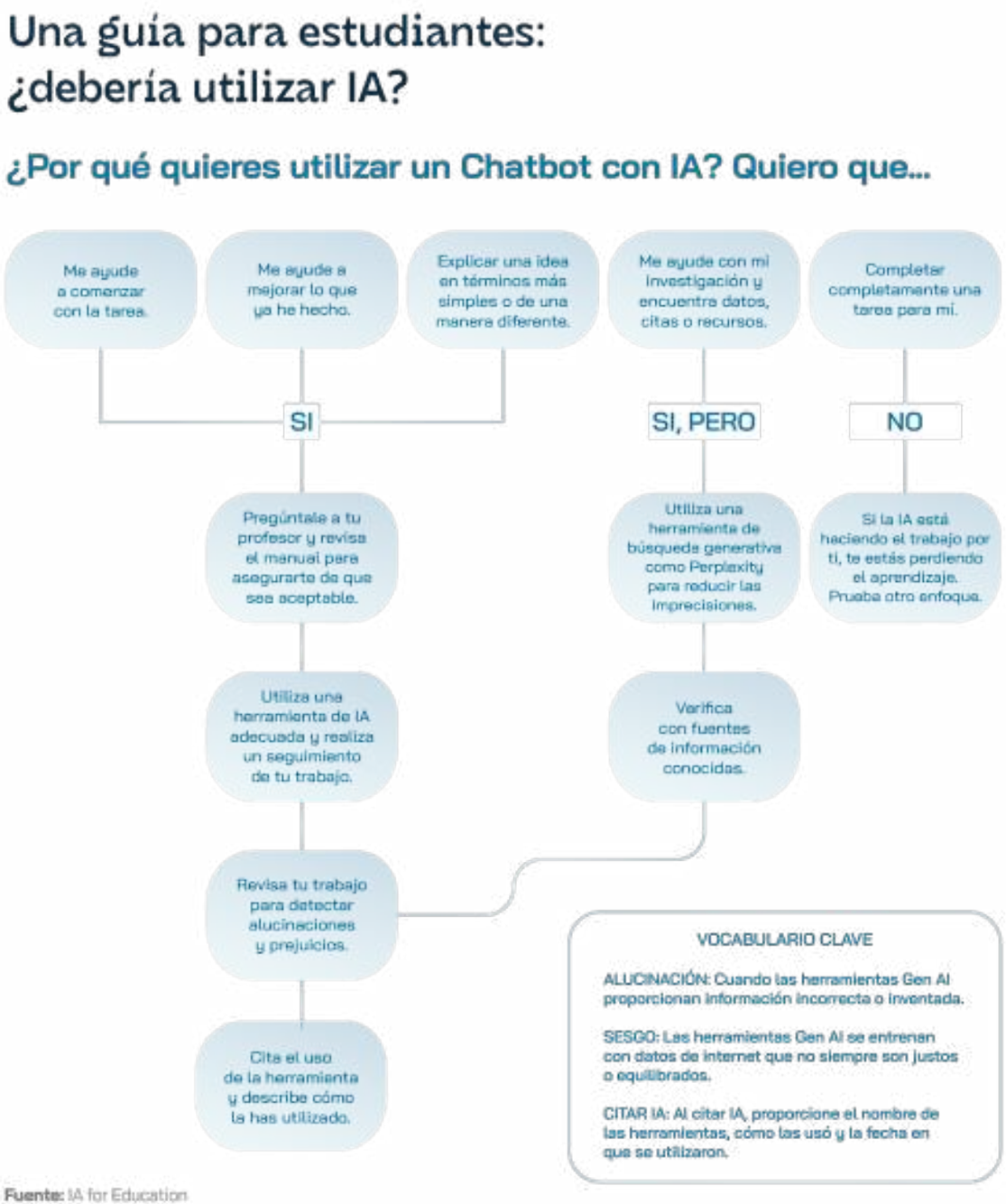
En el capítulo dedicado a los retos de desarrollar la IA en español explicamos tanto la historia de la tecnología como los principios básicos de su funcionamiento. Dedicaremos estas líneas a explorar las diferentes maneras en que la IA (y los modelos de lenguaje LLM, como ChatGPT y otros) podrían transformar la educación en los próximos años. Por ejemplo, gracias a los sistemas de IA podría personalizarse el aprendizaje, mejorar tanto la evaluación como la atención a los alumnos y también transformar los recursos educativos en materiales accesibles de forma rápida y barata. [1]Tradicionalmente, la educación ha seguido un enfoque de "clase magistral", donde todos los alumnos reciben el mismo material por parte de los profesores, con una talla única y escasa adaptación personalizada, independientemente de sus habilidades individuales, estilos de aprendizaje o ritmos de progreso. Sin embargo, gracias a la IA, podría adaptarse la enseñanza a las necesidades específicas de cada estudiante, como ocurre por ejemplo en la medicina personalizada. En este sentido, los tutores inteligentes –sistemas basados en IA que interactúan con los estudiantes en tiempo real– podrían proporcionar explicaciones detalladas y responder a preguntas personalizadas de manera inmediata.[2]

Igual que ChatGPT puede adaptar la complejidad o el tono de sus respuestas, según los requisitos del usuario, estos tutores inteligentes podrían ajustar el nivel de dificultad del material según el desempeño del estudiante, y así ofrecer una retroalimentación e interacción personalizadas, incluso sugerir recursos adicionales para reforzar áreas donde el estudiante puede estar teniendo dificultades. Además, pueden facilitar el seguimiento de los alumnos incluso cuando trabajan desde casa, algo que también favorece a mejorar la igualdad entre estudiantes, sea cual sea su situación personal y condición económica.[3] Esta capacidad de personalización podría no solo mejorar la comprensión y retención de los estudiantes, sino que también aumentaría su motivación y su compromiso con el aprendizaje. Algunos estudios sugieren que la IA podría hacer la educación más sostenible, democratizando el acceso a todo tipo de contenidos y formatos de aprendizaje desde cualquier parte del mundo.[4]

Además de estos tutores inteligentes, la IA también ayuda a encontrar contenido adaptado a las preferencias y necesidades de cada alumno.[5] Gracias a los algoritmos avanzados y los LLM, pueden analizarse el progreso y los intereses del estudiante para sugerir materiales educativos personalizados. Por ejemplo, si un estudiante muestra un interés particular en la historia medieval de España, el sistema puede recomendar libros, artículos, videos y actividades relacionadas con ese tema. Esta personalización y adaptación del contenido no solo enriquece la experiencia educativa del estudiante, sino que también fomenta la pasión por el aprendizaje, porque permite conectar los estudios con sus intereses personales.[6]

La IA también transformará el trabajo de los profesores. Los métodos de evaluación tradicional a menudo implican exámenes escritos y calificaciones manuales, y ese puede ser un proceso lento y propenso a errores. En exámenes estandarizados "tipo test" (que ya actualmente siguen métodos de corrección automatizados) esos errores pueden ser difíciles de detectar. La IA evitaría la gran mayoría de esos fallos, incluso podría automatizar la lectura y calificación de exámenes y trabajos escritos. Gracias a los sistemas conectados, además, las correcciones y los comentarios podrían llegar de forma relativamente inmediata a los estudiantes.[7] Estos sistemas no solo son más rápidos, sino que también pueden ser más precisos, porque eliminan una gran parte de los sesgos humanos y aseguran una evaluación más justa y equitativa.[8] Los LLM podrían proporcionar unas correcciones detalladas y personalizadas para cada alumno, que resalten las áreas específicas donde el estudiante necesita mejorar y, al mismo tiempo, proporcionen tanto estrategias como materiales complementarios para poder hacerlo.[9] Un análisis del Foro Económico Mundial también destaca otras ventajas para los profesores: reducir la carga de trabajo, gracias a la IA, podría permitir a los docentes tener más tiempo para atender mejor a su alumnado y disminuir su desgaste profesional. Actualmente, los profesores dedican menos de la mitad de su tiempo directamente a los alumnos. Disponer de sistemas que reduzcan su carga de trabajo podría tener como consecuencia una mejor experiencia docente y un incremento en la productividad.[10]

El acceso universal y gratuito a la educación (y a recursos educativos) es fundamental para el avance de una sociedad democrática.[11] Y los LLM pue-



Fuente: IA for Education

den desempeñar un papel clave para lograr una educación más accesible para todos. Los modelos de lenguaje avanzado pueden traducir y adaptar materiales educativos a diferentes idiomas y contextos culturales de forma rápida y eficaz. Aunque algunos expertos vaticinan que disminuirá el interés (y la utilidad) de aprender idiomas,[12] la IA abre un mundo de posibilidades para profesores y estudiantes en todo el mundo. Por ejemplo, un estudiante en una región rural española puede acceder a un curso online de cualquier prestigiosa universidad de Estados Unidos gracias a la traducción automática y a las adaptaciones culturales. Esta capacidad para romper las barreras del idioma y la cultura es esencial para democratizar el acceso a la educación y garantizar que todos los estudiantes tengan las mismas oportunidades de aprender y crecer.[13] La página web Coursera, una de las empresas líderes en educación en internet, anunció a finales del año pasado que utilizaría sistemas de traducción con IA para ofrecer muchas de sus clases en 17 lenguajes minoritarios diferentes, como el griego, el indonesio, el kazajo y el ucraniano, entre otros.[14]

Estas nuevas tecnologías también pueden facilitar el acceso a recursos educativos a los estudiantes con discapacidades, gracias a aplicaciones como los lectores de pantalla en el caso de discapacidad visual (que ya han incorporado muchos medios digitales, como complemento a los lectores que llevan instalados por defecto los móviles y los sistemas operativos) y soluciones de reconocimiento de voz para personas con discapacidades motoras. Además, los LLM pueden generar versiones adaptadas de materiales educativos, como libros de texto en Braille o descripciones auditivas y subtítulos en tiempo real, tanto para el contenido multimedia como para las clases. De esta forma, podemos asegurar que todos los estudiantes tienen acceso a la misma información y pueden participar en las clases.[15] Varios grupos de investigación también trabajan en el desarrollo de robots y herramientas de IA para mejorar la experiencia educativa de alumnos con dislexia y con autismo, para complementar el trabajo de profesores y asistentes sociales. Estos sistemas, a menudo, no solo ayudan a los estudiantes, sino que también aprenden de ellos, de sus gestos, sus preferencias y sus formas favoritas de aprendizaje, y pueden adaptar el contenido educativo para facilitar los avances.[16]

La inclusividad no se limita a las discapacidades físicas. Gracias a las aplicaciones de la IA en educación, también pueden reducirse las barreras entre estudiantes de diversos contextos socioeconómicos. Las plataformas de aprendizaje *online* proporcionan acceso a educación de calidad a estudiantes de todo el mundo, sin importar su ubicación geográfica o situación económica; tan solo se necesita una conexión a internet.[17] Los algoritmos de recomendación personalizados pueden ayudar a los alumnos a encontrar los cursos y materiales más relevantes para sus necesidades, para maximizar su potencial de aprendizaje.[18] Además, varios

ANDRÉS PEDREÑO

La IA tiene el potencial de transformar radicalmente el ámbito educativo, ofreciendo una personalización del aprendizaje sin precedentes. Herramientas de IA pueden adaptar los contenidos y los métodos de enseñanza a las necesidades de cada estudiante, mejorando la retención de conocimientos y reduciendo las tasas de abandono escolar. Además, puede ayudar a los docentes en la gestión del tiempo, automatizando tareas administrativas y permitiéndoles concentrarse en la enseñanza. A largo plazo, la integración de la IA en educación será crucial para preparar a los estudiantes para un mercado laboral altamente digitalizado y automatizado, contribuyendo a cerrar la brecha entre la formación académica y las demandas del futuro.

programas de becas y apoyo están empezando a incorporar sistemas basados en IA para identificar y localizar a estudiantes con talento entre las comunidades más desfavorecidas, utilizando el análisis de datos sobre rendimiento académico para identificar a las personas con mayor potencial y proporcionarles los recursos y el apoyo que necesitan para tener éxito. Estos sistemas pueden incluir no solo becas, sino también tutorías personalizadas, orientación dedicada y acceso a recursos educativos adicionales.[19]

Sin embargo, la IA puede convertirse también en un arma de doble filo: podría amplificar el efecto de sesgos existentes, dado que los algoritmos están entrenados a partir de bancos de datos que a menudo son sexistas y racistas. Los modelos de *machine learning* son tan buenos como los datos de entrenamiento, por tanto es importante utilizarlos de forma educada y crítica para evitar reproducir problemas como los ocurridos en Reino Unido en 2020, cuando se cancelaron los exámenes de entrada a la universidad por la pandemia de COVID-19 y un algoritmo asignó las notas a los alumnos basándose en las notas de secundaria y penalizó a los estudiantes de escuelas de zonas más desaventajadas.[20] No obstante, también existen ejemplos positivos. En varios estudios, entre ellos uno liderado por la Universitat Oberta de Catalunya, se ha demostrado que los algoritmos pueden analizar datos de rendimiento y comportamiento de los alumnos para predecir quiénes presentan un alto riesgo de abandonar los estudios. Esta información permite a los educadores y administradores intervenir de manera proactiva y proporcionar el apoyo necesario para mantener a los estudiantes en el camino hacia el éxito académico.[21] Es importante comprender cómo funciona la IA y aprender formas responsables de utilizarla, así como desarrollar políticas regulatorias estrictas para evitar perpetuar sesgos y maximizar los beneficios de la tecnología en educación.[22]

Además, la IA está transformando la experiencia de aprendizaje al hacerla más interactiva y atractiva. En este sentido, uno de los aspectos más innovadores es la gamificación, una técnica utiliza elementos de juego, como puntos, recompensas y desafíos, para hacer que el aprendizaje sea más atractivo. Los sistemas educativos basados en IA pueden diseñar actividades y lecciones que incorporen estos elementos de forma automática y personalizada, para mantener a los estudiantes comprometidos y motivados. Por ejemplo, plataformas como Duolingo, una aplicación para aprender idiomas, ya utilizan la gamificación. Gracias a la IA, además, estas plataformas podrían adaptar los desafíos según el nivel de habilidad del estudiante y garantizar que el contenido sea al mismo tiempo estimulante y alcanzable. Esto no solo mejora la retención de la información, sino que también fomenta una actitud positiva hacia el aprendizaje.[23]

La colaboración es otra de las áreas donde la IA está haciendo avances significativos. Las plataformas educativas pueden actualizarse para maximizar la interacción y cooperación entre estudiantes y profesores de diferentes partes del mundo, gracias a herramientas como la traducción automática y la generación de contenido. Los algoritmos también pueden mejorar el comportamiento de herramientas ya existentes como foros de discusión, videoconferencias y espacios de trabajo colaborativos gracias a sus habilidades para reconocer textos, responder de manera informada y organizar datos. La IA podría, por ejemplo, moderar interacciones entre estudiantes y proporcionar traducciones y asistencia en directo para facilitar el flujo de la conversación. Esto no solo reduce la carga de trabajo de los profesores (y los moderadores online), sino que también permite que los estudiantes trabajen mejor de forma colaborativa, independientemente de su origen social o geográfico, participen en proyectos donde se compartan ideas sin importar el idioma y puedan aprender unos de otros. Esto no solo enriquece el aprendizaje al introducir diversas perspectivas, sino que también prepara a los estudiantes para trabajar en entornos multiculturales e internacionales en su vida profesional.[24]

En general, la inteligencia artificial está transformando la experiencia educativa, tanto desde el punto de vista del estudiante como el del profesor. La gran mayoría de cambios son avances positivos, como la personalización del contenido, la universalidad, la colaboración y la accesibilidad. Aunque todavía es necesario resolver algunos retos para garantizar un acceso a la IA democrático y equitativo, sobre todo en torno a temas regulatorios.[25] En cualquier caso, más allá de los posibles problemas, la educación podría transformarse en una experiencia más diversa, global e inclusiva. Al fin y al cabo, la educación es un derecho fundamental universal.

Hoja de ruta de implementación de GenAI para escuelas: las 4 fases

Fuente: aiforeducation.io

1. Establecimiento de una base

Reunión introductoria y acuerdo sobre un modelo de alfabetización en inteligencia artificial (IA) generativa para el equipo directivo de la escuela, la junta y otras partes interesadas clave.

Creación de un equipo multifuncional que incluya líderes, maestros, estudiantes y miembros de la comunidad para realizar talleres y desarrollar pautas académicas relacionadas con la IA generativa en la escuela.

Revisión de la estrategia de la organización para la enseñanza y el aprendizaje, a fin de identificar oportunidades para la integración de IA generativa de alto impacto.

2. Desarrollo del personal

Se debe brindar formación para el desarrollo profesional en IA generativa que cubra cómo funciona la tecnología, sus capacidades y limitaciones, y cómo los maestros y los estudiantes pueden adoptar las herramientas de manera responsable.

Compartir un borrador sobre las pautas de uso de la IA generativa para recibir comentarios y trabajar con los maestros en su aplicación práctica diaria en las aulas.

Colaboración entre equipo directivo y maestros para examinar la seguridad y eficacia de las herramientas IA generativa disponibles; se debe determinar qué herramientas probar, que estén alineadas con la visión y la estrategia del centro.

3. Educación de los estudiantes y la comunidad.

Generación de un marco de entendimiento común en el que se compartan las pautas de la IA generativa y cómo respaldan la visión del centro con los cuidadores y los miembros de la comunidad a través de boletines informativos, reuniones municipales, etc.

Apoyo a los maestros en la actualización de sus programas de estudio para incluir las pautas de la IA generativa y creación de un plan para introducir pruebas piloto de herramientas de IA cuando sea apropiado.

Inicio de una capacitación para alfabetizar en IA generativa a los estudiantes de modo que puedan mejorar sus habilidades de los estudiantes y estén preparados para el futuro.

Capacitación continua centrada en el uso integrado y apropiado de la IA generativa a maestros, estudiantes y la comunidad escolar en general.

4. Evaluación y progreso.

Establecimiento de métricas y seguimiento del impacto de las pruebas piloto de IA generativa en los resultados de los estudiantes y otras prioridades organizacionales.

Cadencia para revisar y reevaluar las pautas de la IA generativa a la luz de los nuevos avances.

Evaluación de las nuevas herramientas de IA generativa para determinar su idoneidad para los maestros y el aula y lanzar programas piloto adicionales.

Actualización y capacitación en IA generativa de forma continua en toda la comunidad escolar; se debe incluir oportunidades para elevar las mejores prácticas y expresar inquietudes.

Un paso más en la transformación digital de la educación

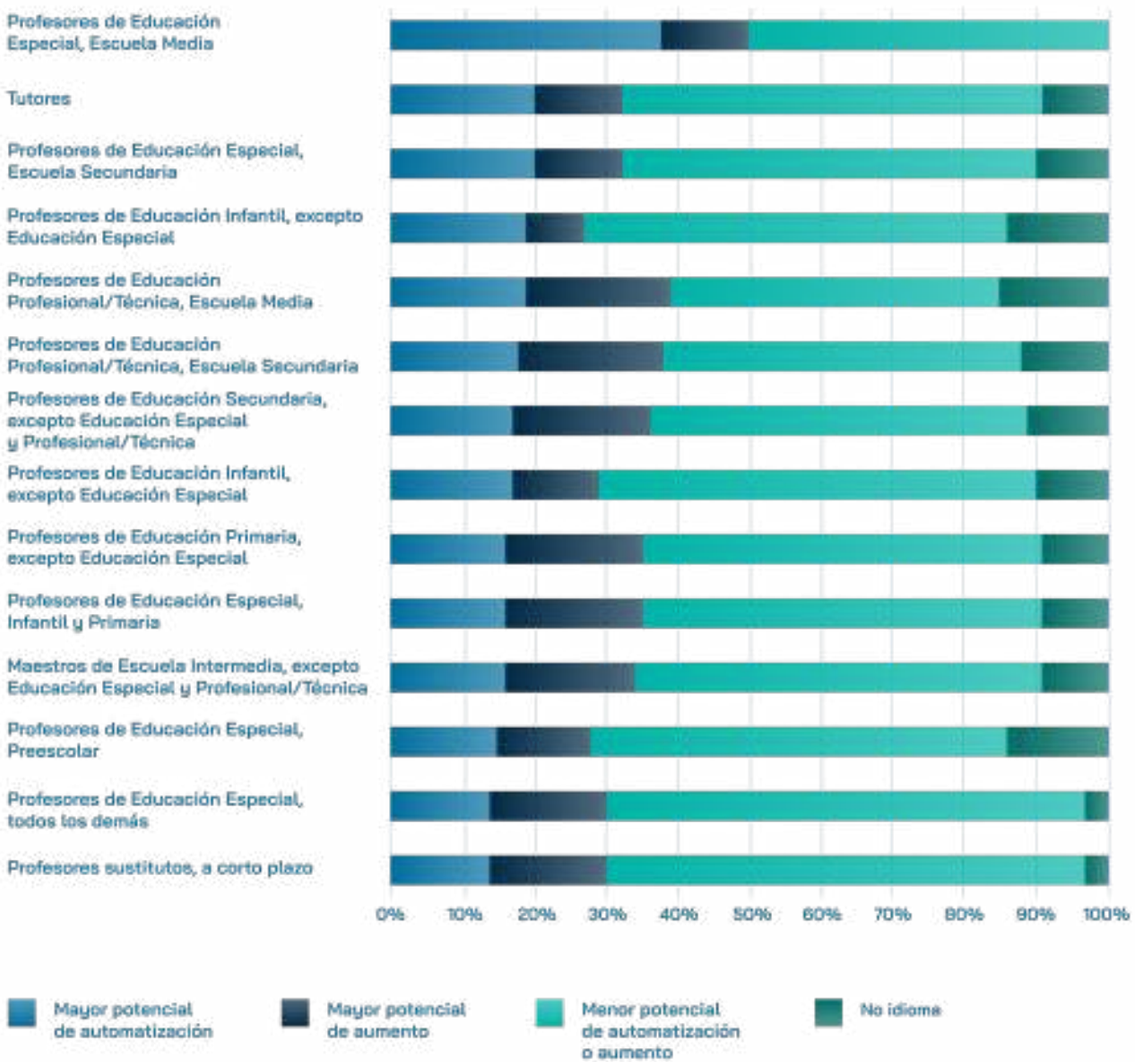
EN ACCIÓN

La mayoría de los profesores del sistema K-12 (entre 5 y 18 años) en Estados Unidos utilizan ya ChatGPT, y esa práctica no deja de aumentar: si en marzo de 2023 lo hacía el 51% de los docentes, en julio de ese año el porcentaje había subido al 63%. El 30% de ellos lo empleó para planificar lecciones, otro 30% para generar nuevas ideas creativas para las clases y el 27% para mejorar sus conocimientos previos.[26] No debe sorprender porque el 88% de los profesores y el 79% de los estudiantes creían a principios de 2023 que ChatGPT tendría un impacto positivo, y el 76% y el 65% respectivamente abogaban por incorporarlo al proceso educativo. En el Reino Unido, el 42 % de los profesores de primaria y secundaria utilizaron IA generativa para ayudar en las tareas escolares en noviembre de 2023, un aumento significativo con respecto al 17 % de abril de 2023.[27] La IA ocupa el tercer puesto entre los diez temas principales que los niños quieren aprender en España y más de la mitad de los padres en Europa se muestran favorables al uso de la IA para evaluar y mejorar los resultados educativos de sus hijos.[28] Estas cifras contrastan con la elevada percepción de riesgo que acompaña todavía a la nueva tecnología, debido a la falta de precauciones con la que se está introduciendo en la educación. La mayoría de profesores afirma que sus centros educativos no disponen de una guía para la IA generativa, no hacen nada para formarles y no cubren la demanda de los estudiantes que desean desarrollarse en el tipo de trabajos que necesitará IA. De algún modo, niños, padres y profesores están descubriendo una de las herramientas tecnológicas más poderosas de la historia de la humanidad... por sí solos.

La regulación reciente plantea, no obstante, un marco muy estricto al respecto. La Ley de Inteligencia Artificial de la Unión Europea incluye en su famoso Anexo III de actividades de "alto riesgo" aquellas dirigidas a determinar el acceso de un alumno a la educación y el nivel de educación al que puede optar, así como las que evalúan los resultados de aprendizaje y monitorizan el comportamiento de los estudiantes durante las pruebas. Estos casos de uso están permitidos, pero requieren de procedimientos estrictos de evaluación de riesgos. Según la norma europea, los profesores y las instituciones educativas tendrán una responsabilidad considerable en el uso adecuado de las herramientas de IA que sugieren o toman decisiones y no deberán recurrir a sistemas que permiten interpretar el estado emocional de una persona en el contexto de la educación. Aunque su planteamiento resulta menos explícito que el europeo, la Ley de Privacidad y Derechos Educativos de la Familia (FERPA) de Estados Unidos permite a los maestros usar software educativo sin el permiso de sus padres o tutores siempre que exista un interés legítimo y se limite el intercambio de información.[30]

Pero las herramientas de IA pueden exceder fácilmente estas excepciones, particularmente entre los estudiantes menores de 13 años, dependiendo de si se despliegan en un entorno abierto o cerrado y de la procedencia de los datos.[31] Son habituales, por eso, las llamadas de alerta. Los profesores usan mayoritariamente herramientas de IA generativa, en efecto, pero casi el 50% expresan malestar acerca del peligro de uso irresponsable por parte de los estudiantes, el 62% quiere orientación sobre cómo enseñarles a utilizarla y el 54% reclama estrategias para identificar las malas prácticas.[32] Algunas derivadas de la implantación de la tecnología son imprevisibles: un experimento demostró que una aplicación de IA basada en ChatGPT era nociva para el rendimiento de los alumnos porque, en lugar de ayudar, resultaba ser más bien una distracción. La conclusión de los investigadores fue que el desafío no se limita simplemente a agregar nueva tecnología como si fuera un fin en sí mismo, sino que implica repensar todo el proceso de aprendizaje de los estudiantes y descubrir cómo les puede ayudar la IA, de forma que no sea simplemente un complemento llamativo y aparentemente inofensivo.[33] En esa línea, el Gobierno de Estados Unidos considera clave introducir transparencia sobre los modelos de IA, porque los educadores necesitan algo más que un aviso, deben comprender cómo funcionan. La selección de un modelo de IA puede ser una vía de limitación de la oferta de aprendizaje de un centro educativo, ya que no existe la IA de propósito general. Insta, por eso, a proceder con un pensamiento sistémico. El ámbito del aprendizaje es más amplio que sólo el componente de IA.[34] De hecho, el enfoque

Potencial de automatización y aumento de los empleos educativos



Fuente: Foro Económico Mundial / Accenture

tradicional de la IA en la educación se está diversificando e incorpora cada vez más procesos de cocreación en los que se involucra a investigadores, estudiantes, profesores y desarrolladores desde la perspectiva del aumento de la inteligencia y no de la sustitución, hacia las soluciones híbridas entre humanos y IA.[35]

La capacidad actual de las herramientas IA generativa para producir contenido muy parecido a la escritura humana representa también una amenaza significativa para la imparcialidad y autenticidad de la evaluación académica. Un sondeo descubrió que el 26% de los educadores de K-12 habían identificado en 2023 al menos un estudiante haciendo trampa usando ChatGPT.[36] El problema es que si las instituciones o los profesores adoptan un enfoque individualista y escogen diferentes aplicaciones para detectar si sus alumnos se han valido de IA generativa, teniendo en cuenta que la tasa de acusaciones falsas se estima todavía en torno el 15%, se podrían ver afectados valores como la inclusión y la equidad educativa,[37] en beneficio de los estudiantes deshonestos. Las herramientas de detección de IA puedan manipularse o eludirse fácilmente utilizando técnicas adversas relativamente simples. La precisión media de los detectores de contenido generado por IA no manipulado es del 39,5%, pero baja al 22% si se aplican técnicas adversas, mientras que si ha sido escrito por humanos la precisión es del 67%.

Una encuesta entre los Estados miembros del Consejo de Europa puso de manifiesto en 2022 que sólo 4 de 23 contaban con políticas y regulaciones para el uso de sistemas de IA en la educación.[38] En noviembre de 2023, solo el 4% de los distritos educativos norteamericanos tenían una política formal y documentada para regular el uso de la IA. Alrededor del 52% reconocían que sus profesores estaban incorporando la IA de forma independiente en su práctica.[39] El Consorcio para la creación de redes escolares y el Consejo de las Escuelas de las Grandes Ciudades trataron de paliarlo publicando conjuntamente una "Lista de verificación de preparación para la IA generativa K-12", un cuestionario desarrollado en asociación con Amazon Web Services. TeachAI implicó a 60 expertos, gobiernos y organizaciones, incluidos Code.org, ETS, la Sociedad Internacional de Tecnología en la Educación, Khan Academy y el Foro Económico Mundial, en la elaboración de una "Guía de herramientas de IA para escuelas". Con un alcance menor, en países como Chile, el Ministerio de Educación lanzó en mayo de 2023 una guía para fomentar el aprendizaje activo con ChatGPT[40] y lo mismo han hecho estados norteamericanos como Carolina del Norte, cuya guía insta a revisar los proveedores de EdTech que implementan IA generativa para examinar su seguridad, privacidad, confiabilidad y eficacia.[41]
Frente a la reacción pausada de las instituciones educativas, el mercado de

productos de IA no deja de incorporar nuevas opciones para los docentes, y pocas de ellas son evaluadas exhaustivamente. Las barreras de entrada para crear una startup educativa basada en IA resultan extremadamente bajas, porque es la propia herramienta la que facilita su propia expansión: la IA generativa ha democratizado el desarrollo de software y permite que muchas más personas lo puedan escribir con sólo disponer de una pizca de conocimiento de código. Si se puede describir, probablemente se pueda construir, es el mantra actual. Se está nivelando el terreno de juego y casi dos tercios de las organizaciones ya están explorando activamente la integración de la IA.[43] En ese sentido, las nuevas empresas se aprovechan de que la digitalización ha penetrado en el sistema educativo al igual que en otras áreas de la economía y la sociedad. Desde plataformas de VLE (virtual learning environment) y MOOC (massive online open courses), hasta encuestas interactivas, almacenamiento de aplicaciones y datos, análisis de aprendizaje y software de detección de plagio, múltiples propuestas inexistentes hace dos décadas se han vuelto hoy centrales.[44] La UNESCO afirma en un informe que "escasean pruebas buenas e imparciales sobre el impacto de la tecnología educativa... gran parte de la evidencia proviene de quienes intentan venderla".[45]

La demanda no es el problema en el nuevo mercado mundial de la educación. El tamaño actual de la IA en él ronda los 4.000 millones de dólares, pero se espera que aumente a 30.000 millones de dólares en 2032 debido a su creciente uso en la educación superior y la capacitación corporativa.[46] Si ampliamos el foco, se estima que la IA generativa podría aportar 200.000 millones de dólares en valor al sector educativo global en 2025, porque la recapacitación y el reciclaje de trabajadores podrían requerir 16.000 millones de dólares en inversiones,[47] suponiendo que sólo alrededor del 6% de los afectados opte por ello. Paradójicamente, casi todos los países de Europa se encaminan hacia un escenario de escasez de docentes, que alcanzará los 25.000 puestos vacantes en Alemania hasta 2025, los 30.000 en Portugal

MANUEL DE LEÓN

La IA proporciona instrumentos extraordinarios para abordar los desafíos de la educación actual, con su capacidad de innovación en las maneras de enseñar y aprender, y la posibilidad de llegar a cualquier rincón del planeta. Ya se está utilizando y pronto será una presencia indispensable en las aulas. Deben cuidarse sin embargo los riesgos que un mal uso conlleva. Por ello, el mandato de la UNESCO exige un enfoque de la IA centrado en el ser humano, y que garantice que la IA no amplíe la brecha tecnológica entre regiones.

hasta 2030 y los 4.000 ya en Francia. La previsión de jubilaciones masivas impactará especialmente en la escuela primaria, ya que el 60% de los docentes tienen más de 50 años en Italia, el 37% en Alemania, el 42% en Portugal, el 36% en Suecia y el 23% en Francia.[48] Y la migración de los doctorados en IA de la academia a la industria continúa creciendo a un ritmo acelerado. Puede definirse como una auténtica fuga de talentos: en 2022, el 70% se incorporaron a una empresa tecnológica y sólo el 20% a la universidad, 5,3 puntos porcentuales más en sólo un año.[49]

La demanda de soluciones basadas en IA responde también a una necesidad operativa clara. La educación y el aprendizaje serán las industrias más afectadas por la IA en los próximos tres a cinco años.[50] En los países de la OCDE, los docentes dedican de media aproximadamente la mitad de su tiempo semanal a la enseñanza y la otra mitad, unas 17 horas, a actividades de organización y planificación. En el aula, sólo el 78% del tiempo se dedica a actividades de aprendizaje, mientras que otro 13% se utiliza para gestionar el comportamiento y el 8% para tareas administrativas. Los profesores pueden reasignar entre el 20 y el 30% de su tiempo a actividades que ayuden a mejorar el aprendizaje de los estudiantes, y uno de los campos más prometedores en ese sentido tiene que ver con el desarrollo de habilidades sociales y emocionales. Se dedican alrededor de 3,5 horas a ello y el potencial de aumentarlas reasignando el tiempo ahorrado en otras tareas resulta evidente.[51] Es fácil prever que el mercado de herramientas de apoyo a los docentes será multimillonario en Europa y la entrada de la IA generativa llevará a una nueva dimensión a las soluciones de evaluación y retroalimentación de preguntas, en las materias en las que las respuestas correctas tienden a ser más factuales y prescriptivas así como a las de planificación y preparación de lecciones, posiblemente el ámbito más dinámico en la actualidad.

En la primera mitad de 2024, había cerca de 550 nuevas empresas de IA en educación en Europa, entre ellas algunas ya relevantes como Shape Robotics, Iris.Ai, Soapbox Labs, Up Learn y Seervision.[52] La mayoría de startups de edtech son locales y tienen soluciones verticalizadas dirigidas a mejorar la comunicación entre profesores y padres o a la digitalización de los pagos en las escuelas. Muchas acabarán siendo adquiridas por empresas grandes en busca de volumen dentro de la verdadera batalla competitiva, la que tiene como objetivo liderar los sistemas operativos de los centros educativos en toda Europa. Será así porque, aunque muestran diferencias, las escuelas e institutos acaban teniendo actividades centrales muy similares en todo el continente en lo que se refiere a horarios, proporciones de clases, planes de estudio, pedagogía y funciones administrativas. Es la hora de los creadores de herramientas altamente integradas con el resto de la tecnología de los centros docenes, aquellas que permitan a los profesores acelerar sus tareas de la mano de un asistente de enseñanza que conoce sus necesidades locales. La compañía austríaca Teachino,[53] con su asistente de IA Thena, es una de las más interesantes en ese sentido, mientras que otras como la suiza Taskbase[54] y sAInaptic[55] ponen el foco en la evaluación con sistemas b2b para alinear las respuestas de los estudiantes con los objetivos de aprendizaje diseñando tutorías inteligentes y comentarios personalizados.

El aterrizaje de estas nuevas soluciones requiere en paralelo de una adecuación de la infraestructura de las tecnologías de la información y las comunicaciones en los centros educativos. El proyecto GoVR de Go Student ayuda a los niños a aprender idiomas en una experiencia de realidad virtual en la que el contenido se traduce y genera en tiempo real para que parezca que el usuario está hablando con un compañero en otro país.[56] La Ferris State University, ha desarrollado dos estudiantes de IA, llamados Ann y Fry, que participarán en clases como cualquier otro alumno, entregando tareas y participando en debates en el aula. Ann y Fry podrán elegir especialidad y eventualmente obtener su título universitario, si así lo deciden.[57] En la Universidad de Murcia, Vodafone y Samsung han puesto en marcha un sistema de traducción simultánea, pero ha sido posible porque lo han reforzado con la potencia de conectividad y baja latencia del 5G y no todos los espacios educativos están preparados para dar ese salto. Fuera del mundo desarrollado, 244 millones de niños no van a la escuela[58] y las soluciones basadas en IA podrían ser una vía interesante de alfabetización si se impulsan los teléfonos inteligentes compartidos y de bajo coste capaces de funcionar *offline*.[59]

UNICEF[60] ha revelado que un tercio de las plataformas de aprendizaje digital creadas durante la pandemia del COVID-19 ya no se mantienen ni actualizan y la gran mayoría carece de contenido interactivo. La Comisión Europea se ha marcado como objetivo que, en 2030, la proporción de

alumnos de octavo grado con bajo rendimiento en alfabetización informática e informacional sea inferior al 15%. Antes de la pandemia de COVID-19, solo el 37,5% de los docentes de secundaria inferior en la UE sentían que estaban bien o muy bien preparados para utilizar las tecnologías digitales en la enseñanza.[61] Los Estados miembros disponen de un apoyo significativo para la inversión en educación y capacidades a través del Mecanismo de Recuperación y Resiliencia, que asciende a más de 70.000 millones de euros,[62] pero nada está asegurado, tienen que competir por esa financiación con muchos otros ámbitos de la economía y la sociedad. Entre las iniciativas abiertas para ofrecer nuevas opciones al ecosistema docente, EIT Digital y otras 12 organizaciones europeas líderes en educación, investigación y tecnología han lanzado el proyecto EMAI4EU para formar profesionales en el campo de la inteligencia artificial emocional. Participan las españolas Universidad Politécnica de Madrid y Tech Valley Management.[63]

El poder transformador de la IA en la educación se aplica también a sus extraordinarias capacidades para extraer conocimiento a partir de datos. La escuela Khan Lab en Mountain View (California, EEUU) y el Departamento de Educación de la ciudad de Nueva York utilizan IA para pronosticar las tasas de deserción estudiantil y proporcionan asistencia y orientación a los alumnos a partir de esta información. La Universidad de Pittsburgh, por su parte, emplea la tecnología para analizar el rendimiento de los estudiantes en evaluaciones estandarizadas y brindar a los maestros recursos y apoyo que contribuyan a lograr mejores resultados.[64] Un estudio reciente de la Universidad de Stanford ha demostrado que tutorías breves, de apenas 10 minutos al día, pueden mejorar significativamente las habilidades de alfabetización de los estudiantes jóvenes.[65] El mercado mundial de tutoría privada podría crecer de 57.920 millones de dólares en 2023 a 105.980 millones de dólares en 2030, pero sin soluciones de IA que ayuden a democratizar el acceso, sus beneficios se restringirán a aquellos que pueden permitírselo.

Las tareas que tienen más probabilidades de beneficiarse del potencial de aumento de los LLM tienden a enfatizar las capacidades analíticas y de resolución de problemas,[66] pero la IA en educación no sólo ayuda a los estudiantes a mejorar sus habilidades de pensamiento computacional en el aula. También puede crear nuevas formas de conectar con sus entornos locales, permitirles pensar críticamente sobre los problemas ecológicos y ayudarlos a encontrar soluciones realistas.[67] Los alumnos de secundaria en Maine analizaron las capacidades de un comedero para pájaros con IA antes de sumergirse en el análisis de los datos históricos sobre los frailecillos que viven en la costa.[68]

Las aulas españolas piden más IA

ESPAÑA

España tiene algunos nombres propios destacados en la llamada revolución Edtech. Luis Pérez-Breva, por ejemplo, es director de la Facultad de Innovación de Equipos Empresariales del MIT. Llamativamente, la principal plataforma tecnológica en la que se basa esta iniciativa es también española. Se llama Global Alumni, la fundó Pablo Rivas y tiene su sede central en Madrid. Gestiona las inscripciones, la tecnología y la asistencia de los participantes. Inauguró la sala de telepresencia inmersiva más grande del mundo en Boston y trabaja los programas online de la Universidad de Chicago. MIT Professional Education ofrece programas cortos actuales, micromásters diseñados en muchos casos a mediados de la pasada década, que atraen a más de 1.500 estudiantes al año de todo el mundo. Las personas se formarán en un contenido breve, centrado en el desarrollo de una habilidad específica, demostrarán competencia a través de una evaluación y se les emitirá una "credencial". Sin embargo, pese a contar con pioneros como Rivas y Pérez-Breva, una de las cuestiones más inquietantes del futuro tiene que ver con la capacidad de nuestros centros académicos de excelencia para hacer frente al tsunami de la revolución EdTech.

Para el desafío de aprovechar el tiempo que libera la inteligencia artificial a los profesores, se han lanzado iniciativas como EMAI4EU[69] un proyecto de cuatro años para formar profesionales en el campo de la inteligencia artificial emocional. Junto a EIT Digital, forman parte del consorcio las españolas Universidad Politécnica de Madrid, Saturno Labs y Tech Valley Management. El resto de integrantes son Université Côte d'Azur, Université de Rennes, Eurecom y LudoTIC (Francia); Universidad de Trento, Universidad Politécnica de Milán y Medispa Srl (Italia); Universidad de Turku (Finlandia); y Universidad Eötvös Loránd (Hungría). El programa insignia de EMAI4EU se centra en Inteligencia Artificial de Emociones y se dirige a ayudar a las máquinas a interpretar y responder adecuadamente las emociones humanas.

El primer Observatorio del Impacto de la Tecnología en las Profesiones elaborado por la Universidad Alfonso X el Sabio,[70] en el que han participado más de 2.000 estudiantes y casi 400 profesores y profesionales, revela que tres de cada cuatro estudiantes menores de 25 años en España utilizan la IA generativa, mientras que la media de uso entre los profesionales se sitúa en el 36%, con especial incidencia en la franja de edad de 35 a 45 años (44%). Cuando se pregunta a los niños y las niñas en España sobre qué temas quieren aprender,[71] el desarrollo de tecnología en inteligencia artificial, realidad virtual y realidad aumentada aparece en primer lugar, por delante de habilidades para la vida. A continuación, se sitúa de nuevo la inteligencia artificial en general, seguida de robótica, sostenibilidad y educación climática, codificación y programación, finanzas, bienestar y salud mental, asuntos actuales y artes creativas. Y no sólo los niños están entusiasmados con el potencial de la IA: más de la mitad de los padres en Europa se muestran favorables a su uso) para evaluar y mejorar los resultados educativos de sus hijos, y la mitad piensa que recibir enseñanza en un aula virtual (usando realidad virtual) mejorará la experiencia de aprendizaje.

Genially, Odilo, Smile & Learn, ABA English, Lingokids, Ironhack y Fiction Express son algunas de las edtech españolas que más inversión han captado en los últimos años. Se estima que el sector cuenta con unas 250 empresas, por encima de Alemania y muy cerca de Francia, con un centenar más.[72] A mediados de 2022, Odilo cerró la ronda de financiación más abultada protagonizada por una edtech en nuestro país, por 60 millones de euros.[73] Se autodefine como una plataforma similar a Netflix o Spotify, que selecciona de forma inteligente y personalizada entre el mayor catálogo educativo digital del mundo, con títulos y experiencias de aprendizaje de más de 6.300 de los mejores proveedores de ebooks, cursos, podcast, vídeos, revistas, prensa, recursos educativos, resúmenes, películas o apps educativas en 43 idiomas diferentes. Otra empresa con largo recorrido de innovación en nuestro país es Smartick, un método de aprendizaje online con inteligencia artificial que logra adaptarse en tiempo real al ritmo y capacidad de aprendizaje de cada alumno.

GAUBI es una app de uso escolar para el aprendizaje y la enseñanza de ortografía lanzada por investigadores de la UNED. Al contar con el respaldo

de investigadores de diferentes universidades y, gracias a falta de presión por lograr rentabilidad económica, tiene varios aspectos únicos que la hacen más fácilmente integrable en entornos escolares y educativos, entre ellos mecanismos de control parental y docente, ausencia de anuncios, no recoge información personal de los estudiantes y no aloja ningún dato en servidores.

Descripción general de las categorías de GenAI Edtech

Aprendizaje y soporte personalizados
- Herramientas de estudio
- Asistentes de profesores y copilotos
- Visitas virtuales
- Aprendizaje social y emocional
- Salud mental

Desarrollo profesional y de habilidades
- Orientación profesional y desarrollo de habilidades
- Aprendizaje de idiomas
- Empoderamiento de la fuerza laboral
- Gramática y escritura

Creación y mejora de contenidos
- Creación de contenidos educativos
- Juegos y gamificación

Eficiencia operativa y gestión
- Administración de educación
- Análisis de datos y conocimientos

Investigación y acceso a la información
- Investigación impulsada por IA

Integridad académica
- Detección de trampas por IA

De más de 280 herramientas de tecnología educativa en su cartera, la empresa Reach Capital las ha organizado en 6 categorías principales y 15 categorías secundarias.

Fuente: MRS Bulletin

Relación de notas

[1] A. Tombazzi, J. Choukeir, N. Lai. "**The shifting landscape of learning and AI**". Royal Society of Arts. Publicado el 10/08/2023, consultado el 23/07/2024.

[2] Sai Gaddam. "**One AI Tutor Per Child: Personalized learning is finally here**". Medium. Publicado el 16/03/2023, consultado el 23/07/2024.

[3] J.K. Kim et al. J. Marketing Res. 2021, 59, 1, 79, DOI: **10.1177/00222437211050351**

[4] C.-C. Lin et al. Smart Learn. Environ. 2023, 10, 41, DOI: **10.1186/s40561-023-00260-y**

[5] M.J.K.O. Jian. "**Personalized learning through AI**". Adv. Eng. Innov. 2023, 5, 16, DOI: 10.54254/2977-3903/5/2023039

[6] Lasse Rouhiainen. "**How AI and Data Could Personalize Higher Education**". Harvard Business Review. Publicado el 14/10/2019, consultado el 23/07/2024.

[7] Vicki Philips. "**AI, VR, And The Future Of Assessment In Schools**". Forbes. Publicado el 26/03/2024, consultado el 23/07/2024.

[8] Adnan Ajšić. "**AI can help fix student evaluations**". Times Higher Education. Publicado el 23/04/2024, consultado el 23/07/2024.

[9] Alexander Slagg. "**AI for Teachers: Defeating Burnout and Boosting Productivity**". EdTech. Publicado el 14/11/2023, consultado el 23/07/2024.

[10] Wendy Kopp y Bo Stjerne Thomsen. "**How AI can accelerate students' holistic development and make teaching more fulfilling**". World Economic Forum. Publicado el 01/05/2023, consultado el 23/07/2024.

[11] T. Leach et al. Oxford Rev. Educ. 2024, 5, 4, 484, DOI: **10.1080/03054985.2023.2239702**

[12] Louise Matsakis. "**The End of Foreign-Language Education**". The Atlantic. Publicado el 26/03/2024, consultado el 23/07/2024.

[13] John Nosta. "**Improving AI Translation—A Leap Toward Global Inclusivity**". Psychology Today. Publicado el 06/06/2024, consultado el 23/07/2024.

[14] Marni Baker Stein. "**Coursera expands AI-powered translations to 17 popular languages**". Coursera Blog. Publicado el 05/12/2023, consultado el 23/07/2024.

[15] "**Exploring the Role of AI in Special Education**". 21K School. Publicado el 29/02/2024, consultado el 23/07/2024.

[16] Alina Tugend. "**How Robots Can Assist Students With Disabilities**". New York Times. Publicado el 29/03/2022, consultado el 23/07/2024.

[17] Centre for Progressive Policy (2024). "**AI in education: can it raise us up or will it divide us further?**" Consultado el 23/07/2024.

[18] A. Tombazzi, J. Choukeir y N. Lai. "**AI-enabled personalised learning: opportunities and challenges**". Royal Society of Arts. Publicado el 18/08/2023, consultado el 23/07/2024.

[19] California State University Fullerton (2022). "**Can Artificial Intelligence Help Increase Diversity in STEM?**" Consultado el 23/07/2024.

[20] Bryan Walsh. "**How an AI grading system ignited a national controversy in the U.K.**" AXIOS. Publicado el 19/08/2020, consultado el 23/07/2024.

[21] "**Artificial intelligence can identify students at risk of failing and provide tools for success**". Phys.org. Publicado el 02/05/2022, consultado el 23/07/2024.

[22] Philippa Hardman. "**The AI-Education Divide**". Publicado el 29/06/2023, consultado el 23/07/2024.

[23] C. Dichev, D. Dicheva. Int. J. Educ. Tech. Higher Educ. 2017, 14, 9, DOI: **10.1186/s41239-017-0042-5**

[24] Jessica Pack. "**Using AI to Enhance Universal Design for Learning**". Edutopia. Publicado el 01/04/2024, consultado el 23/07/2024.

[25] UNESCO (2023). "**UNESCO: Governments must quickly regulate Generative AI in schools**". Consultado el 23/07/2024.

[26] **AI Chatbots in Schools, Impact Research**, mayo de 2024

[27] "**Generative AI in Education**", Government of the United Kingdom Department for Education, 2023

[28] "**GoStudent Future of Education Report 2024**", GoStudent, 2024

[29] Katriina Palo-Närhinen, "**How does the new EU AI Act affect the adult education sector?**", all-digital.org, 7 de mayo de 2024, consultado el 21/06/2024

[30] **Framework for Implementing Artificial Intelligence (AI) in K-12 Education,** ILO Group, 2024

[31] Andrew Westrope, CITE23: **AI Tools Raise New Legal Questions for K-12, Government Technology**, 29 de noviembre de 2023

[32] "**Demand for More AI PD**", AI for Education, 2023

[33] Dmitri Butalov, "**What's Next in EdTech: ChatGPT-Free, Expert Perspective on Industry Trends**", dataart.com, 22 de febrero de 2024, consultado el 21/06/2024

[34] "**Artificial Intelligence and the Future of Teaching and Learning: Insights and Recommendations**", U.S. Department of Education, Office of Educational Technology, 2023

[35] Inge Molenaar, **Towards hybrid human-AI learning technologies**, European Journal of Education, 2022, doi.org/10.1111/ejed.12527

[36] "**ChatGPT in The Classroom**", Study.com, 2023

[37] Mike Perkins et al. "**GenAI detection tools, adversarial techniques and implications for inclusivity in higher education**", Preprint, marzo de 2024, doi.org/10.48550/arXiv.2403.19148

[38] "**Regulating Artificial Intelligence in Education**", Consejo de Europa, 2023

[39] Michael B. Horn, "**AI is Officially Here, There, Everywhere, and Nowhere**", Education Next, 2024

[40] **https://ciudadaniadigital.mineduc.cl/wp-content/uploads/2023/05/Guia-para-Docentes-Como-usar-ChatGPT-Mineduc.pdf**

[41] "**North Carolina Generative AI Implementation Recommendations and Considerations for PK-13 Public Schools**", North Carolina Department of Public Instruction, 28 de enero de 2024, consultado el 25/06/2024

[42] Tony Wan, "**Pipeline Perspectives: Trends From 280+ Generative AI Edtech Tools**", Reach Capital, 11 de septiembre de 2023

[43] Annie Davis, "**A new collaboration with OpenAI charts the future of AI in higher education**", ASU News, 18 de enero de 2024

[44] F. Concannon, E. Costello, O. Farrell, T, Farrelly, L. Graves Wolf, "**There's an AI for that: Rhetoric, reality, and reflections on EdTech in the dawn of GenAI**", Irish Journal of Technology Enhanced Learning, 2023, doi.org/10.22554/ijtel.v7i1.116

[45] "**Informe de seguimiento de la educación en el mundo, 2023: tecnología en la educación: ¿una herramienta en los términos de quién?**", UNESCO, 2024, doi.org/10.54676/NEDS2300

[46] "**Artificial Intelligence (AI) in Education Market size to exceed $30 bn by 2032**", Global Market Insights, 2 de febrero de 2023

[47] "**Generative AI Is Set to Shake Up Education**", Morgan Stanley, 22 de diciembre de 2023

[48] "**AI and the surge of digital tools for teachers**", Brighteye Ventures, 29 de noviembre de 2023

[49] Nestor Maslej et al., "**The AI Index 2024 Annual Report,**" Institute for Human-Centered AI, Stanford University, abril de 2024

[50] "**Global opinions and expectations about artificial Intelligence**", Ipsos, enero de 2022

[51] Abdulkadir Özbek, "**The Surprising Time-Saving Power of Tech for Teachers: The McKinsey Global Teacher and Student Survey Insights**", Medium, 25 de febrero de 2024, consultado el 21/06/2024

[52] **AI in Education startups in Europe**, Tracxn, 6 de abril de 2024, consultado el 21/06/2024

[53] **https://www.teachino.io/**

[54] **https://www.taskbase.com/**

[55] **https://www.sainaptic.com/**

[56] Carrie Ryan, "**Map the New Horizon**", EdTech Digest, 10 de enero de 2024

[57] Melissa Frick, "**Your classmate could be an AI student at this Michigan university**", 8 de enero de 2024, consultado el 21/06/2024

[58] "**New estimation confirms out-of-school population is growing in sub-Saharan Africa**", Unesco, 2022

[59] Frank van Cappelle, "**Can AI transform learning for the world's most marginalized children?**", World Economic Forum, 17 de octubre de 2023

[60] "**Pulse check on digital learning**", UNICEF, diciembre de 2022

[61] **Education and Training Monitor 2023**, Comisión Europea, 2023

[62] **Investing in education 2023**, Comisión Europea, 2023, data.europa.eu/doi/10.2766/529409

[63] Federico Guerrini, "**EMAI4EU: A new frontier in Emotion AI education across Europe**", EIT Digital, 19 de febrero de 2024

[64] **https://www.manchester.global/blogs/artificial-intelligence-in-education-transforming-schools**

[65] Kalena Cortes, Karen Cortecamp, Susanna Loeb, Carly D. Robinson, "**Year Two Results Assessing the Effects of a Scalable Approach to High-Impact Tutoring for Young Readers**", National Student Support Accelerator, diciembre de 2023

[66] "**Shaping the Future of Learning: The Role of AI in Education 4.0**", World Economic Forum, abril de 2024

[67] Jey Willmore, "**AI education and AI in education**", NSF, 4 de diciembre de 2023

[68] **https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=2241777**

[69] Federico Guerrini, "**EMAI4EU: A new frontier in Emotion AI education across Europe**", EIT Digital, 19 de febrero de 2024

[70] **https://www.uax.com/noticias/la-universidad-alfonso-x-el-sabio-presenta-el-observatorio-del-impacto-de-la-tecnologia-en-las-profesiones-con-foco-en-ia-generativa**

[71] **GoStudent Future of Education Report 2024**, GoStudent, 2024

[72] Félix López Capel, "**El estado del Edtech en España**", El Referente

[73] **https://www.odilo.es/odilo-levanta-60me-de-inversion-para-llevar-el-aprendizaje-ilimitado-a-cualquier-organizacion/**

Créditos

COMITÉ CIENTÍFICO DE EXPERTOS.

María José Alonso Fernández.
Editora en jefe de la revista Drug Delivery and Translational Research (DDTR). Ex-presidenta de Controlled Release Society (CRS). Investigador Principal Instituto de Investigaciones CIMUS de la Universidad de Santiago de Compostela (USC). Catedrática de Farmacia y Tecnología Farmacéutica en la USC.

Pablo Artal Soriano.
Doctor en Física y Catedrático de Óptica en la Universidad de Murcia. Fundador de la empresa de base tecnológica Voptica. Presidente del panel de Física en la Agencia Estatal de Investigación. Premio Nacional de Investigación 2018

María Blasco Marhuenda.
Doctora en Bioquímica y Biología Molecular. Directora del Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO). Premio Nacional de Investigación 2010.

Lina Gálvez Muñoz.
Europarlamentaria (Vicepresidenta de la Comisión de Industria, Investigación y Energía. Miembro de la Comisión de los Derechos de la Mujer e Igualdad de Género y del Panel para el Futuro de la Ciencia y la Tecnología). Catedrática de Historia e Instituciones Económicas en el Departamento de Economía de la Universidad Pablo Olavide (Sevilla).

Laura Lechuga Gómez.
Profesora de Investigación del CSIC (GENCAT-CSIC-UAB), Jefa del Grupo de Nanobiosensores y Aplicaciones Bioanalíticas en el ICN2 y en el CIBER-BBN. Premio Nacional de Investigación 2020.

Nuria Oliver Ramírez.
Directora de investigación de ciencia de datos en Vodafone. Chief Data Scientist Data-Pop Alliance. Co-fundadora y consejera científica de Fundación Ellis de Inteligencia Artificial.

Manuel de León Rodríguez.
Matemático y Doctor en Ciencias Matemáticas. Profesor de Investigación del CSIC y Académico de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Ha sido Fundador y Director del Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT).

Susana Marcos Celestino.
Directora del Centro de Ciencia Visuales de la Universidad de Rochester. Profesora de Investigación y Directora del Laboratorio de Óptica Visual y Biofotónica del Instituto de Óptica del CSIC. Vicepresidenta del Comité Científico Asesor de la Agencia Estatal de Investigación. Premio Nacional de Investigación 2019.

María Ángela Nieto Toledano.
Profesora de Investigación en el Instituto de Neurociencias (CSIC-UMH) en Alicante, miembro de CIBERER y Presidenta de la Sociedad Internacional de Biología del Desarrollo (ISDB). Premio Nacional de Investigación 2019.

Andrés Pedreño Muñoz.
Catedrático de Economía Aplicada, ex rector de la Universidad de Alicante y ex CEO de Universia.

Héctor Perea Saavedra.
Ingeniero industrial. Ex Director de Estrategia y Desarrollo de Negocio en CEPSA.

Emma Fernández.
Ingeniera de telecomunicaciones y MBA. Ha desarrollado su carrera profesional en el sector de la tecnología en compañías de referencia como Telefónica, Alcatel e Indra. En esta última fue Directora General, entre 2006 y 2015.

Francisco Marín.
Socio de CONEXO y presidente del Consejo Asesor de la empresa consultora AYMING. Compagina estas actividades profesionales con la Vicepresidencia de la Comisión de I+D+I de CEOE, como Miembro Honorario de COTEC y Vicepresidente del Foro de Empresas Innovadoras. En 2020 recibió el Premio Nacional a la Trayectoria Innovadora.

Javier Ventura-Traveset Bosch.
Doctor Ingeniero de Telecomunicaciones. Director de la Oficina Científica de Navegación por Satélite y Secretario Ejecutivo del Comité Científico Asesor del programa Galileo de la Agencia Espacial Europea (ESA), Portavoz en España de la ESA y miembro de la Real Academia de Ingeniería de España.

Fernando Temprano.
Doctor en Ciencias Químicas y Máster en Administración de Empresas. Desde 2007 hasta 2017 fue director de la división de I+D y tecnología de Repsol, con responsabilidad mundial en ese ámbito.

CÁTEDRA CIENCIA Y SOCIEDAD FUNDACIÓN RAFAEL DEL PINO.

La Cátedra Ciencia y Sociedad de la Fundación Rafael del Pino nace en 2019, liderada por el científico y emprendedor Javier García Martínez. Su función consiste en analizar, debatir y comunicar el impacto de la ciencia y la tecnología en la sociedad, entendida ésta de una forma amplia, abarcando la economía, el empleo, la seguridad, la energía y la calidad de vida en España.

CATEDRÁTICO RAFAEL DEL PINO.

Javier García Martínez.
Miembro del Consejo de Tecnologías Emergentes del Foro Económico Mundial. Presidente IUPAC 2022 y 2023. Catedrático de Química Inorgánica y director del Laboratorio de Nanotecnología Molecular de la Universidad de Alicante. Presidente de la Academia Joven de España.

INFORME 10 TECNOLOGÍAS PARA IMPULSAR A ESPAÑA.

Fernando Gomollón Bel.
Doctor en química orgánica y experto en comunicación científica. Autor de las diez tecnologías (textos y elaboración de material infográfico).

Eugenio Mallol Sanchis.
Periodista, divulgador y analista. Autor del análisis y la hoja de ruta y colaborador en las diez tecnologías (ecosistema innovador).

Concepto visual, infografías, diseño y maquetación:
Germinal & Brandon Love.

Supervisión editorial:
Eugenio Mallol Sanchis.

Deposito legal: **M-26301-2024**