

BOLETÍN DE TENDENCIAS 2026

Oficina Nacional de
Prospectiva y Estrategia

Índice

00

Introducción 3

01

Nuevas vidas,
nuevos vínculos 6

02

Territorios que
transforman 12

03

Naturaleza como
sistema crítico 18

04

Materiales y energía
renovada 25

05

Mundos
reprogramables 29

06

El futuro de la
salud 36

Introducción

España vive un momento de transformaciones profundas, simultáneas y, a menudo, difíciles de interpretar. Cambios tecnológicos acelerados, transiciones demográficas sin precedentes, tensiones ambientales crecientes y reconfiguraciones sociales conviven e interactúan, configurando un contexto de elevada incertidumbre. En este escenario, comprender el futuro no consiste tanto en anticipar escenarios cerrados como en aprender a identificar e interpretar las señales de cambio.

Boletín de Tendencias nace con la vocación de ofrecer un marco de lectura para transformaciones incipientes. Se trata de una serie de publicaciones anuales que recopilará señales de cambio: indicios tempranos que todavía no configuran dinámicas plenamente consolidadas, pero que apuntan a posibles direcciones de transformación con capacidad de modificar de forma significativa nuestros sistemas sociales, económicos, tecnológicos y ambientales.

Boletín de Tendencias tiene, además, una doble naturaleza. Las señales que aquí se reúnen forman parte de una colección viva, en actualización permanente, publicada en el repositorio de *Tendencias futuras* de la Oficina Nacional de Prospectiva y Estrategia: allí se incorporan nuevas señales y las ya recogidas evolucionan —una señal incipiente puede consolidarse, revisarse o dar paso a otra— a medida que se acumula evidencia. Este informe es la fotografía anual de esa colección: fija su estado en un momento determinado. El repositorio es, por tanto, la referencia que sigue creciendo; el informe, la instantánea de un año.

El análisis de estas señales parte de una premisa fundamental: los grandes cambios rara vez aparecen de forma repentina. Suelen gestarse a partir de avances científicos, cambios en prácticas sociales o innovaciones tecnológicas que, en sus fases iniciales, pasan desapercibidas o resultan difíciles de interpretar. Prestar atención

a estas señales no implica asumir que todas se materializarán, sino reconocer su potencial para abrir nuevas preguntas sobre el futuro.

Desde esta perspectiva, *Boletín de Tendencias* apuesta por un enfoque de exploración abierta. Las señales recogidas en esta serie surgen de desarrollos actuales con potencial de amplificarse en el medio o largo plazo; de avances científicos que anticipan cambios de paradigma; tecnologías emergentes con implicaciones sociales aún inciertas o de transformaciones incipientes en prácticas sociales.

El propósito de *Boletín de Tendencias* es estimular la reflexión y el debate en un contexto de incertidumbre estructural, contribuyendo con píldoras de análisis para pensar futuros complejos. La capacidad de anticipación no se basa en acertar lo que vendrá, sino en fortalecer la atención colectiva hacia los cambios que ya están en marcha - incluso cuando todavía son incipientes- y en utilizar esas señales para revisar decisiones presentes, identificar nuevas oportunidades y ampliar las formas de imaginar lo posible.

Esta edición de *Boletín de Tendencias: tendencias y señales de cambio* se caracteriza por una lectura interconectada del cambio. Las transformaciones de los vínculos sociales se entrelazan con el desarrollo tecnológico; la transición energética depende tanto de la innovación en materiales como de la reorganización del territorio; la salud humana se concibe cada vez más como la interacción entre estilos de vida, sistemas productivos y ecosistemas. Esta mirada transversal permite captar tanto sinergias como tensiones entre distintas dinámicas de cambio y sirve como hilo conductor de la publicación. A partir de este enfoque, la edición reúne una selección de 20 señales que, desde distintos ámbitos, apuntan a transformaciones profundas en la forma en que vivimos, nos organizamos y nos relacionamos con el entorno.

Metodología

La metodología empleada en *Boletín de Tendencias* se fundamenta en la identificación, contraste e interpretación de señales de cambio, como base para la exploración de transformaciones futuras en fases iniciales. Esta señal puede manifestarse como un comportamiento emergente, como una tecnología en fases iniciales, una iniciativa incipiente, o incluso como una manera distinta de abordar un problema ya conocido.

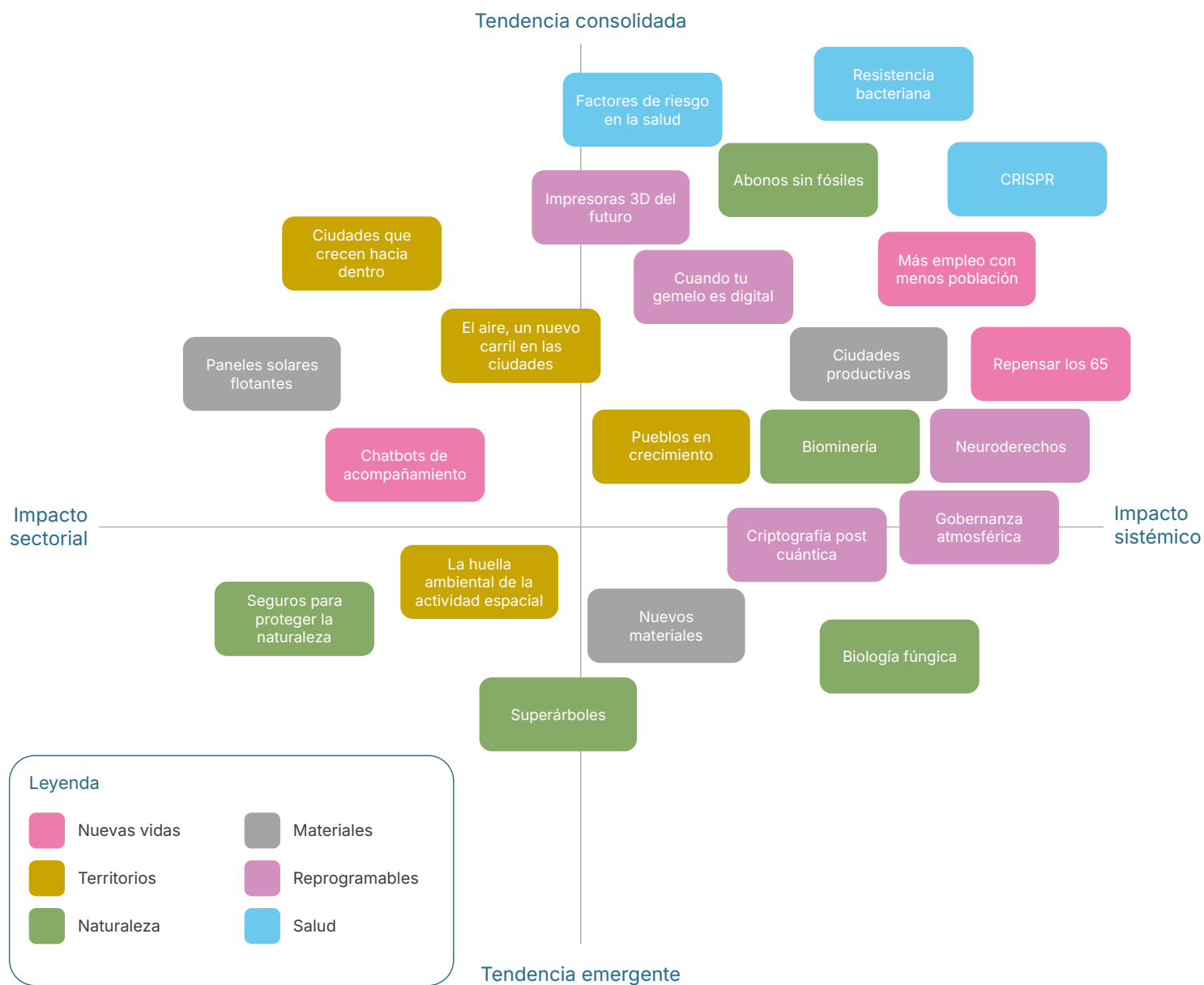
Para identificar señales, nuestros análisis parten de las siguientes preguntas: ¿se trata de un cambio todavía incipiente, sin una presencia generalizada ni consolidada?, ¿resulta llamativo, sorprendente o difícil de explicar desde los marcos actuales?, y ¿podría estar señalando una transformación aún mayor si se extendiera? Así una señal de cambio debe ser un fenómeno real, pero de baja visibilidad, que desafíe supuestos o marcos dominantes y que pueda constituir un primer indicio de transformaciones más amplias.

La identificación de señales se apoya en la observación y en la atención a ámbitos muy diversos. Realizamos una exploración abierta de temas y sus posibles conexiones. El proceso combina el seguimiento de investigación científica, informes institucionales, series de datos y cambios normativos con la observación de espacios donde los cambios emergen tempranamente, como medios de comunicación o debates públicos. Dado que la identificación de señales de cambio está inevitablemente influida por la mirada de quien observa, un mismo fenómeno puede percibirse como novedoso en un contexto y como algo asumido en otro, en función de la experiencia, el marco cultural o el ámbito de conocimiento. Las señales detectadas se ponen en común, se discuten y se revisan desde distintas perspectivas.

La fase final del proceso se centra en la interpretación conjunta de las señales identificadas. Cuando varias señales se analizan en conjunto, su agrupación permite identificar patrones, tensiones o dinámicas comunes que apuntan a tendencias futuras. Las tendencias se entienden como configuraciones emergentes que conectan distintas señales y permiten captar transformaciones de mayor alcance. Una vez formulada una tendencia, el análisis se orienta a explorar qué cambios podría introducir si se desarrollara en el tiempo, así como sus posibles efectos en distintos ámbitos y las condiciones que podrían favorecer o limitar su evolución. Estas tendencias no se presentan como predicciones ni como procesos inevitables, sino como hipótesis de trabajo que ayudan a interpretar el presente y a formular nuevas preguntas sobre el futuro.

Para facilitar su lectura y análisis comparado, las tendencias se clasifican según dos dimensiones: su grado de consolidación en el presente y el tipo de impacto que generan en el sistema. El grado de consolidación refleja hasta qué punto el fenómeno está extendido y es reconocible en distintos contextos, mientras que el eje de impacto indica si la tendencia produce efectos principalmente acotados a un sector, aunque estos puedan ser profundos, o si puede generar efectos en cascada que se extienden más allá del sector directamente involucrado, afectando también a estructuras económicas, sociales, tecnológicas o ambientales. Esta clasificación no implica un juicio sobre su deseabilidad ni una predicción sobre su evolución futura, sino que actúa como una herramienta analítica para ordenar y contextualizar los cambios observados.

Diagrama de categorización de las tendencias





| CAPÍTULO

01

Nuevas vidas,
nuevos vínculos

Repensar los 65. Envejecer ya no es lo que era

La demografía no es un destino.

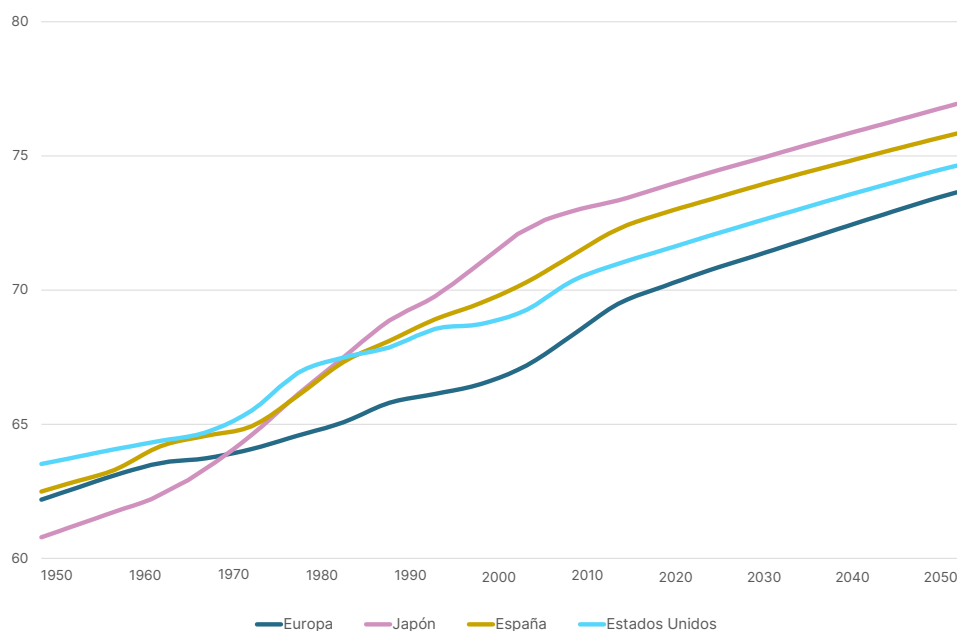
Durante décadas, la entrada a la vejez quedaba definida por un umbral fijo de edad, generalmente los 65 años, como si a partir de ese momento se produjese un cambio radical en nuestras capacidades físicas y cognitivas. Este enfoque del envejecimiento basado en nuestra *edad cronológica*, aunque útil en muchos ámbitos, ignora aspectos tan relevantes para la prosperidad económica de un país como son las ganancias de esperanza y calidad de vida logradas en los últimos años o el hecho de que no todas las dimensiones del envejecimiento importen igual para la realización de ciertas tareas o actividades.

Es por ello que varios académicos ya proponen una nueva definición de la entrada a la vejez más dinámica, que trate de reflejar la *edad funcional* de las personas. En concreto, *Lutz et al.* establecen

que la entrada a la vejez se produzca cuando el número de años de esperanza de vida restantes sea inferior a 15. Según esta definición, en nuestro país, una persona sería "vieja" con 65 años en 1970 pero no lo sería hasta los 76 años en 2050.

Al incorporar esta visión prospectiva del envejecimiento, las estimaciones del impacto negativo que puede tener en el crecimiento económico a largo plazo se reducen considerablemente. Kotschy y Bloom encuentran que, para los países de la OCDE, el efecto negativo de la caída de la población en edad de trabajar sobre el crecimiento del PIB entre 2020 y 2050 se reduciría a la mitad. En el caso de España, el país de Europa con la mayor esperanza de vida al nacer, la mejora respecto a los cálculos en los que se emplea la edad cronológica es todavía más significativa.

Fig.1. Umbral de la entrada a la vejez (edad a la que la esperanza de vida restante es inferior a 15 años)



Fuente: elaboración propia a partir de *Prospective Age Dataset*

Para más información, véase: Kotschy, Rainer, y David E. Bloom. «Population Aging and Economic Growth: From Demographic Dividend to Demographic Drag?» Working Paper Series. National Bureau of Economic Research, 2023.
<https://doi.org/10.3386/w31585>

Chatbots de acompañamiento para no sentirnos solos

Vivir sol@s, migrar lejos de nuestro lugar habitual de residencia, trabajar en remoto o socializar más a través de redes sociales y menos quedando para tomar un café. Estas son algunas de las realidades que están alterando nuestras relaciones sociales y afectivas, y que explican, en parte, el aumento de los problemas de salud mental entre jóvenes y mayores. En este contexto, la inteligencia artificial surge como una fuente de compañía y un recurso frente a la soledad no deseada, una experiencia negativa que nace del desajuste entre las relaciones que tenemos y las que deseamos tener, y que suele traducirse en una sensación de vacío y en la ausencia de vínculos de confianza.

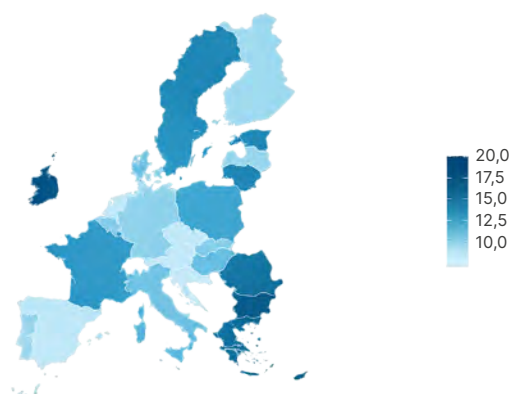
En 2022, el 10,5 % de la población española mayor de 16 años reconocía sufrir esta situación, una proporción que en países como Irlanda o Grecia era de casi el doble y que podría continuar en ascenso durante las próximas décadas. Algunos estudios ya cifran las pérdidas asociadas a la soledad no deseada en el 4 % del PIB de nuestro país debido a la combinación de más gasto sanitario, más muertes prematuras, una menor productividad laboral y un deterioro creciente de la calidad de vida.

Los asistentes virtuales de acompañamiento pueden ofrecer alivio frente a la soledad: proporcionan escucha activa, validación y

compañía, y pueden incluso ayudar a reducir la ansiedad y la depresión, dos condiciones estrechamente vinculadas a la propia soledad. Además, son accesibles, fáciles de utilizar y permiten superar barreras que dificultan el recurso a la atención psicológica tradicional como los horarios laborales, la distancia o el coste. En España, estas tecnologías ya se están empezando a aplicar. Entre los más jóvenes, por ejemplo, la plataforma *ZicoAsis* permite mantener conversaciones con una IA que les ayuda a ordenar las ideas, sentirse acompañados y reforzar sus procesos terapéuticos, facilitando también la detección temprana de problemas de salud mental. El software *Serenia* hace lo propio con las personas mayores, ofreciéndoles compañía y actividades de estimulación cognitiva.

Sin embargo, el uso intensivo de estos chatbots puede generar cierta dependencia y llegar a limitar las interacciones sociales, desplazando el contacto humano en lugar de complementarlo. El reto está en aprovechar su capacidad para contribuir al bienestar mental y emocional sin dejar de lado la importancia del contacto real con otras personas. Los seres humanos somos criaturas sociales y la evidencia nos dice que es en el vínculo con los demás donde florece buena parte de nuestro bienestar a largo plazo.

Fig.2. Prevalencia de la soledad no deseada en personas de 16 o más años (% de la población, 2022)



Fuente: elaboración propia a partir de *EU Loneliness Survey*.

Para más detalle, véase: Casal, Bruno, Berta Rivera y Eva Rodríguez. «La factura social de la soledad no deseada». Nada es Gratis, 8 de mayo de 2025. <https://nadaesgratis.es/admin/la-factura-social-de-la-soledad-no-deseada>; Dolz-del-Castellar, Blanca, Alejandro de la Torre-Luque, Chiara Castelletti, et al. «Loneliness trajectories and predictors in Spain: Results from the Spanish longitudinal study on aging and health (Edad con Salud)». *Journal of Affective Disorders* 378 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jad.2025.02.084>; Domínguez, Daniel. «La IA empática que facilita la tarea al psicólogo». Nos Unen Las Personas. *El País*, 2025. <https://elpais.com/sociedad/branded/nos-unen-las-personas/2025-05-07/la-ia-empatica-que-facilita-la-tarea-al-psicologo.html>; Heinz, Michael V., Daniel M. Mackin, Brianna M. Trudeau, et al. «Randomized Trial of a Generative AI Chatbot for Mental Health Treatment». *NEJM AI* 2, n.º 4 (2025). <https://doi.org/10.1056/Aloa2400802>; Williams, Rhiannon. «OpenAI has released its first research into how using ChatGPT affects people's emotional wellbeing». MIT Technology Review, Accedido 12 de mayo de 2025. <https://www.technologyreview.com/2025/03/21/1113635/openai-has-released-its-first-research-into-how-using-chatgpt-affects-peoples-emotional-wellbeing/>; SERENIA. «SERENIA – La asistente IA de los seniors». Accedido 12 de mayo de 2025. <https://holaserenia.com/>; y Survey Methods and Analysis Centre (SMAC). «EU Loneliness Survey». European Commission, Joint Research Centre, 5 de noviembre de 2024. <https://doi.org/10.2905/JRC.V4VT8T8>

Más empleo con menos población: el futuro de la fuerza laboral en Europa

Europa se encamina hacia un descenso sostenido de su población. En los próximos años, la mayoría de países de la Unión Europea experimentará un retroceso demográfico como consecuencia directa de tasas de fecundidad por debajo del nivel de reemplazo y de cohortes en edades avanzadas cada vez más abultadas.

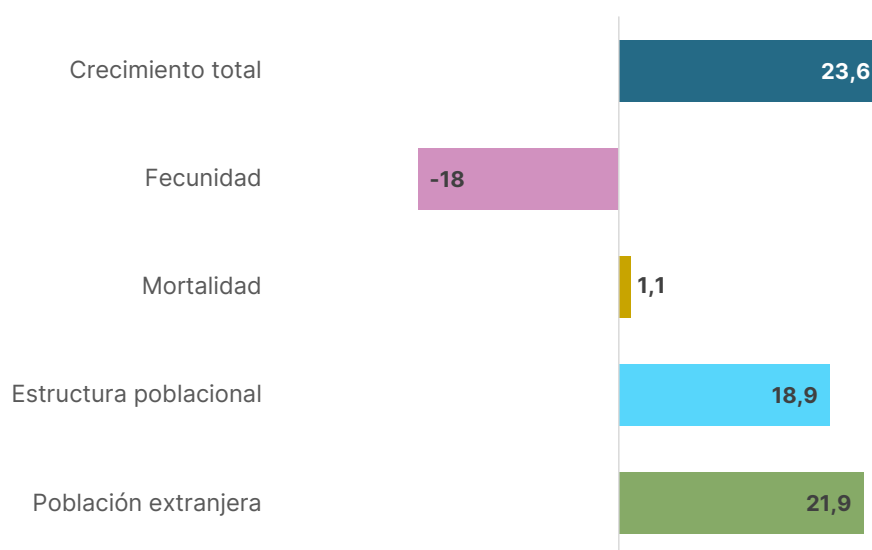
Este fenómeno no es nuevo. Sin inmigración, Europa habría empezado a perder población hace ya una década. En el caso de España, la entrada de población extranjera y una pirámide demográfica todavía favorable han ayudado a compensar la caída de la tasa de fecundidad, permitiendo un crecimiento poblacional del 24 % desde 1990 [Fig. 3].

La evolución demográfica de Europa no será, sin embargo, uniforme. Según un estudio reciente del *Joint Research Center*, los países del centro y este del continente verán cómo su población disminuye de forma acelerada de aquí a 2050 debido a la combinación de bajas tasas de natalidad, un flujo migratorio poco favorable y una estructura

demográfica que refleja décadas de declive. En el sur de Europa, los pronósticos de pérdida de población se explican casi exclusivamente por la fecundidad. Al igual que en España, en Portugal, Italia, Grecia o Malta, la caída demográfica podría rondar el 10 %. En cambio, países como Francia, Alemania o Países Bajos podrían enfrentarse a descensos más moderados gracias a niveles de inmigración más altos y tasas de natalidad estables en cotas superiores a las del sur europeo.

Es bien sabido que el envejecimiento y la reducción del número de jóvenes afectarán a la fuerza laboral y las dinámicas del mercado de trabajo en adelante. Si las tasas de participación laboral por edad y sexo se mantuvieran estables en los niveles actuales, España podría ver caer su población activa hasta en 3 millones de personas de aquí a 2050 según el escenario base de Eurostat (la caída sería mucho más contenida de acuerdo a las proyecciones del INE, que contemplan un saldo migratorio más positivo). Pero este futuro no es inevitable. La población activa puede

Fig.3. Componentes demográficos del crecimiento poblacional en España, 1990–2023 (%)



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Eurostat e INE.

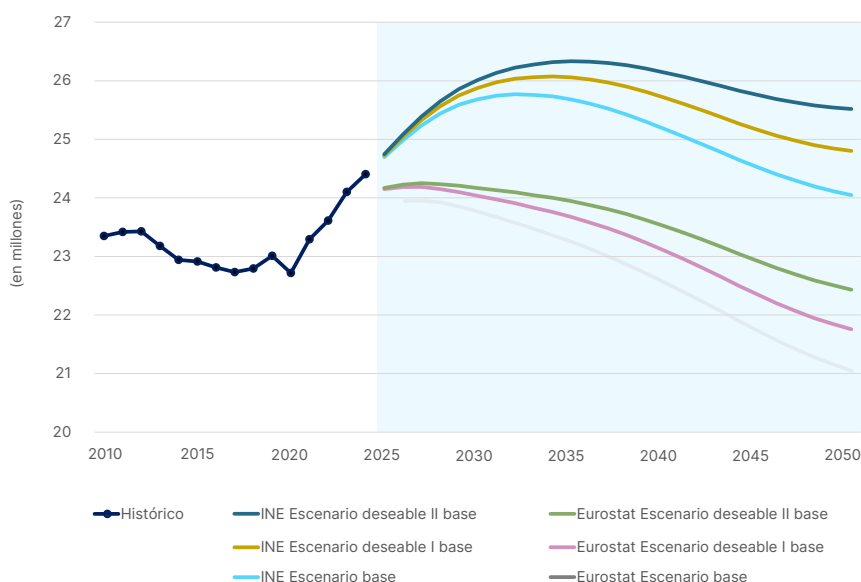
decrecer mucho menos o incluso estabilizarse si conseguimos aumentar la empleabilidad de algunos colectivos con tasas de participación laboral todavía bajas, como es el caso de las mujeres mayores de 55 años o los jóvenes con baja cualificación.

La experiencia de otros países nos sirve de hoja de ruta. En la actualidad, la tasa de participación laboral de las mujeres suecas de entre 25 y 64 años alcanza el 82 %, frente al 75 % de España. Si nuestro país convergiese a ese nivel de participación femenina, lograríamos neutralizar en buena parte el efecto negativo de la demografía sobre la población activa (escenario deseable

I). Algo similar ocurriría si se elevara la tasa de actividad de las personas de más de 55 años (escenario deseable II) [Fig. 4].

El futuro de la fuerza laboral en Europa no dependerá únicamente del tamaño de su población, sino de su capacidad para movilizar el talento disponible. Esto implica invertir en la empleabilidad de todos los grupos sociodemográficos, fomentar vías de migración regular y segura, y garantizar una integración efectiva de las personas extranjeras en el mercado laboral. En un continente que envejece, lograr más empleo con menos población será una de las claves del bienestar colectivo.

Fig. 4. Escenarios hipotéticos de población activa para España



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Eurostat e INE.

Nota:

[Fig. 3]: la barra superior muestra la variación porcentual de la población total en España entre 1990 y 2023. Las contribuciones individuales de cada uno de los cuatro componentes demográficos mostrados en las barras inferiores suman el cambio total. Sus contribuciones individuales indican el cambio en el tamaño de la población si no hubiera habido cambios en los otros componentes.

[Fig. 4]: para construir el escenario base de población activa, se ha aplicado la tasa media de actividad para el período 2020–2024 a la estructura de población proyectada para el período 2025–2050. Para construir el escenario deseable I, se ha aplicado la tasa media de actividad para el período 2020–2024 a todos los grupos de la estructura de población de 2050 excepto a dos: las mujeres con edades comprendidas entre 25 y 54 años y las mujeres con edades comprendidas entre 55 y 64 años. Para estos grupos, se ha fijado como objetivo el 82 % de tasa de actividad, que se corresponde con la tasa de actividad femenina actual de Suecia (“Swedish way” de acuerdo a los escenarios del Joint Research Center). Para construir el escenario deseable II, se ha aplicado la tasa media de actividad para el período 2020–2024 a todos los grupos de la estructura de población de 2050 excepto a cuatro: los hombres y mujeres con edades comprendidas entre 55 y 64 años y los hombres y mujeres con edades comprendidas entre 65 y 74 años. Para los grupos entre 55 y 64 años, se ha fijado el objetivo del 77 % de tasa de actividad. Para los grupos entre 65 y 74 años, se ha establecido el objetivo del 16 %. Ambos se corresponden con las metas fijadas en España 2050 y en la Brújula del país.

Para más información, véase: Andreev, Kirill, Vladimíra Kantorová, y John Bongaarts. *Demographic Components of Future Population Growth*. Technical Paper No. 2013/3. United Nations. Department of Economic and Social Affairs, 2013. <https://doi.org/10.18356/9789211069280>; Biagi, Federico, Deuster, Christoph, y Natale, Fabrizio. *A Demographic Perspective on the Future of European Labour Force Participation*. Publications Office of the European Union, 2025. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/0326281>; Oficina Nacional de Prospectiva y Estrategia (coord.). *España 2050. Fundamentos y propuestas para una Estrategia Nacional de Largo Plazo*. Ministerio de la Presidencia, 2021. https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2021/200521-Estrategia_Espana_2050.pdf; y Ueffing, Philipp, Zubeldia Razquin, Marije, y Fabrizio, Natale. *The Role of Migration and Fertility for the Future Size of the EU's Population*. Publications Office of the European Union, 2025. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/8696792>



| CAPÍTULO

02

**Territorios que
transforman**

El crecimiento hacia dentro de las ciudades: un nuevo paradigma urbano

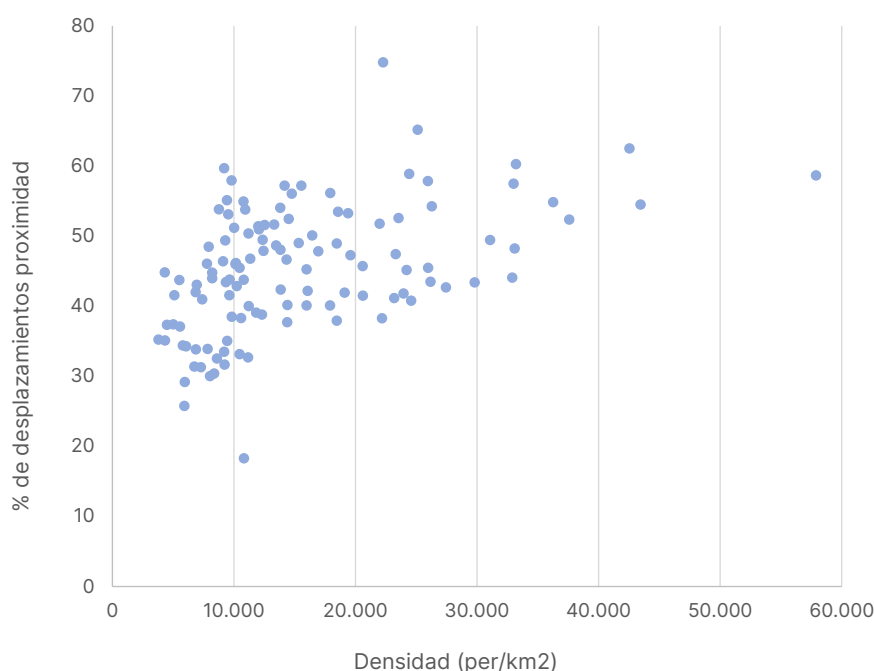
Las ciudades llevan décadas creciendo hacia afuera, ocupando cada vez más espacio y fusionando, en muchos casos, sus límites administrativos. En contraposición a esta tendencia, ha empezado a desarrollarse otra bien distinta: el crecimiento de las urbes hacia dentro.

La redensificación busca precisamente revertir la dispersión urbana y recuperar el modelo tradicional de ciudades compactas y sostenibles. Lo hace mediante el aumento de la edificabilidad en las zonas urbanizadas, la modificación de la tipología de las viviendas, la construcción en solares vacíos o la promoción de usos mixtos del suelo integrando las principales actividades cotidianas en un mismo

espacio. Frente a los barrios dispersos que obligan a recorrer largas distancias para ir a la compra o al cine, y disparan el uso del vehículo privado, la redensificación promueve la sostenibilidad medioambiental y la movilidad activa acercando los servicios necesarios en nuestro día a día a los lugares de residencia.

La evidencia para España nos dice que es en las ciudades con mayor densidad urbana donde se realizan más desplazamientos de proximidad, y sus habitantes viven más cerca de servicios esenciales como colegios, centros de salud y supermercados [Figs. 5 y 6].

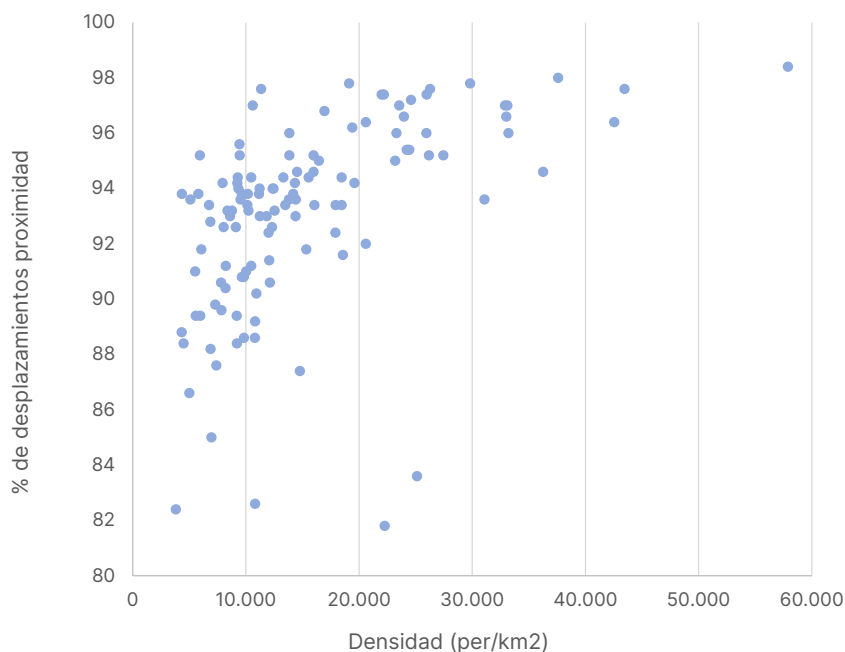
Fig. 5. Relación entre la densidad urbana y la movilidad de proximidad en las ciudades españolas de más de 50.000 habitantes, 2021



Fuente: elaboración propia a partir de datos INE

Nota: Densidad urbana: número de personas por cada km² de suelo residencial. La superficie residencial de cada municipio ha sido obtenida de Indicadores urbanos y la población del Censo Anual de Población, ambas fuentes del Instituto Nacional de Estadística. Movilidad de proximidad: porcentaje de desplazamientos con una distancia inferior a 2 kilómetros sobre el total de desplazamientos realizados en un municipio. Solo se tienen en cuenta los desplazamientos cuyo origen es la vivienda en la que se reside. La fuente es Open Data Movilidad del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Servicios de proximidad: promedio del porcentaje de viviendas en cada municipio que tienen cerca servicios básicos como colegios, hospitales y centros de salud, supermercados, farmacias y bares, y restaurantes. La fuente es la Encuesta de Características Esenciales de la Población y las Viviendas del Instituto Nacional de Estadística.

Fig. 6. Relación entre la densidad urbana y los hogares con servicios de proximidad en las ciudades españolas de más de 50.000 habitantes, 2021



Fuente: elaboración propia a partir de datos INE

En el mundo anglosajón, estandarte del modelo *urban sprawl*, el cambio de paradigma hacia la redensificación está ganando importancia. Ciudades como Toronto, Portland o Auckland, por mencionar solo algunas, ya han apostado por este modelo. En nuestro país, Vitoria-Gasteiz es un referente con su plan de redensificación para Salburua y Zabalgana, dos de sus distritos más extensos.

Si este modelo se generaliza, las ciudades del futuro podrían convertirse en mallas con múltiples centros conectados capaces de ofrecer los principales servicios cotidianos en un recorrido a pie.

Para más detalles, véase: Bajo, Fernando. "Otros procedimientos de intervención en la ciudad contemporánea: sobre la redensificación." ACE: Arquitectura, Ciudad y Entorno 15, 2021. <https://doi.org/10.5821/ace.15.45.9527>; Greenaway-McGrevy, Ryan, y James Allan Jones. "Can zoning reform change urban development patterns? Evidence from Auckland." Urban Studies 0, 2025. <https://doi.org/10.1177/00420980241311521>; City of Toronto. The Good Neighbour Guide. For residential infill construction. https://www.toronto.ca/wp-content/uploads/2017/10/98ad-Good_Neighbour_Guide_Digital-shrunk.pdf; Newman, Peter, y Jeffrey Kenworthy. "Gasoline consumption and cities revisited: What have we learnt?" Current Urban Studies 9, 2021. <https://doi.org/10.4236/cus.2021.93032>; Sony CLS. "15min-City." Sony Computer Science Laboratories Rome, <https://whatif.sonycls.it/15mincity/>.

Pueblos en crecimiento

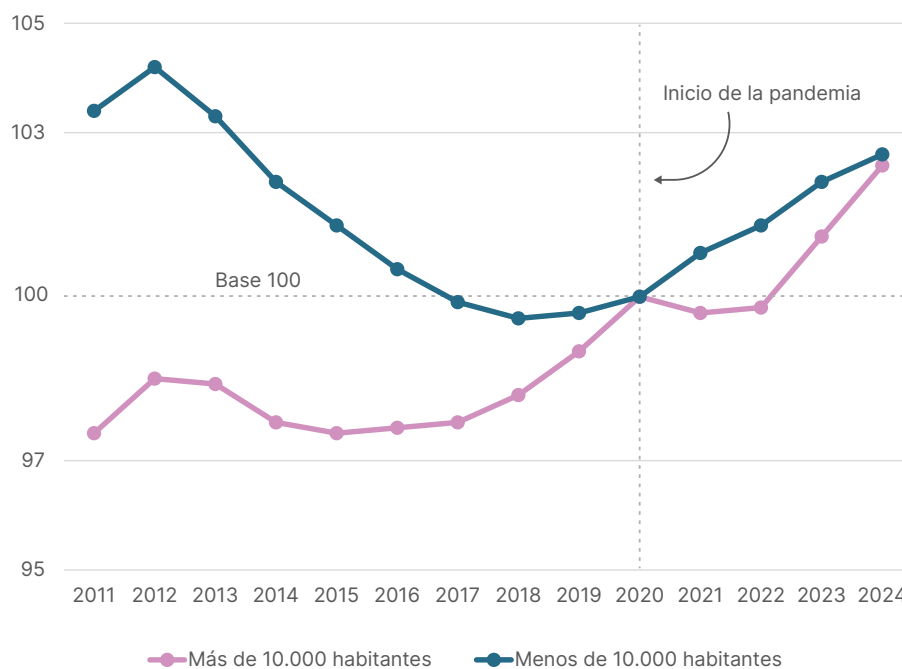
El progreso económico y social de los países a largo plazo viene determinado, entre otras cosas, por la distribución de su población en el territorio. La evidencia nos dice que la concentración demográfica en grandes núcleos urbanos facilita la eficiencia en la prestación de servicios, potencia la innovación y el intercambio de ideas, y fomenta la atracción de talento, generando más crecimiento y más empleo. La contrapartida es el vaciamiento del mundo rural y, con él, la pérdida de dinamismo de las actividades locales y de sectores como la agricultura o la ganadería; el deterioro en el acceso a servicios públicos esenciales como la educación o la atención médica; la degradación de múltiples ecosistemas por falta de gestión del territorio; el aislamiento social o la desaparición de tradiciones.

España ha experimentado un proceso creciente de urbanización: en 2024, el 80 % de la población vivía en ciudades, cuando en los ochenta lo hacía el 72 %. La pérdida de población de los municipios

rurales ha sido continuada, y tuvo en la década de 2010 uno de sus mayores exponentes del pasado reciente.

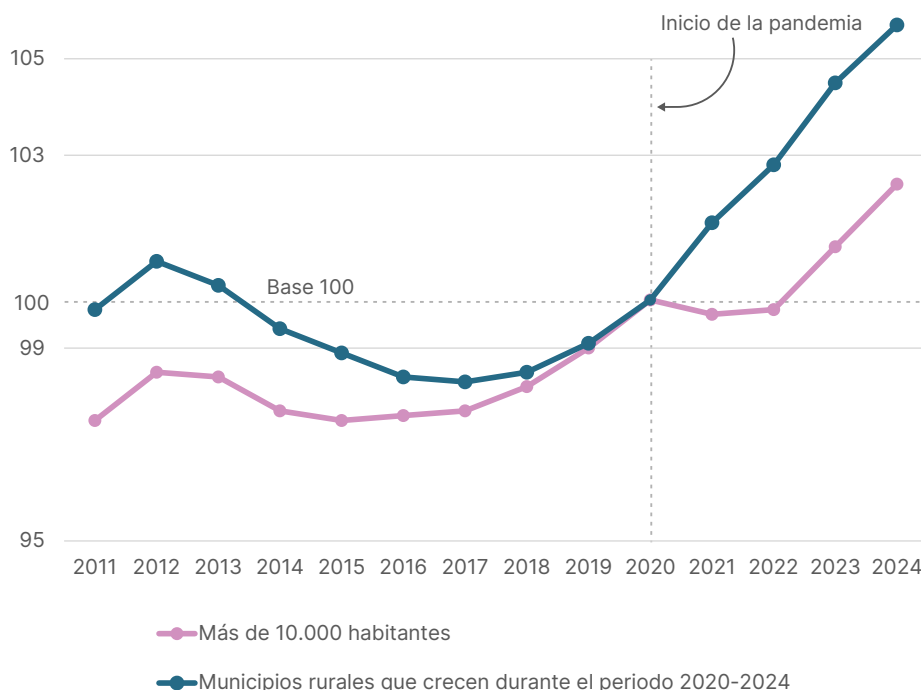
La COVID-19 supuso un punto de inflexión en la caída demográfica del mundo rural. El auge del teletrabajo, el incremento de la digitalización y la búsqueda de contacto con la naturaleza tras meses de confinamiento se tradujeron en una cierta vuelta a los pueblos: entre 2019 y 2022, los municipios de menos de 10.000 habitantes ganaron 150.000 residentes y registraron un crecimiento acumulado del 1,6 %, mayor al de la media nacional. Superada la pandemia, y con datos a 2024, la población rural ha seguido creciendo y lo ha hecho gracias al avance de los municipios próximos a las grandes áreas metropolitanas del país, que parecen haber configurado un nuevo área de alto dinamismo poblacional [Figs. 7 y 8].

Fig. 7. Evolución de la población de las ciudades y los municipios rurales de España (base 100= 2020)



Fuente: elaboración propia a partir de datos INE

Fig. 8. Evolución de la población de los municipios rurales que crecen tras 2020 y de las ciudades de España (base 100= 2020)



Fuente: elaboración propia a partir de datos INE

Los factores detrás de este comportamiento parecen múltiples, pero entre los más relevantes podrían estar la mejora de las conexiones e infraestructuras de transporte, la cercanía de esos pueblos a servicios esenciales o el menor coste de acceso a una vivienda, en un contexto de fuerte subida de precios en la mayoría de ciudades.

El destino de muchos pueblos dependerá de su tamaño actual, su pirámide demográfica, su

proximidad a núcleos urbanos en expansión o su capacidad para generar actividad de forma endógena. Los municipios rurales bien conectados que sepan aprovechar las oportunidades que brindan la transición ecológica y la digitalización para potenciar su atractivo residencial y convertirse en comunidades vivas con proyectos económicos, educativos o culturales propios podrían seguir ganando población en el futuro.

Para más detalle, véase: Banco de España. Informe Anual 2020. Capítulo 4: La distribución espacial de la población en España y sus implicaciones económicas. Banco de España, 2021. https://www.bde.es/f/webbde/SES/Secciones/Publicaciones/PublicacionesAnuales/InformesAnuales/20/Fich/InfAnual_2020-Cap4.pdf; y Oficina Nacional de Prospectiva y Estrategia (coord.). España 2050. Fundamentos y propuestas para una Estrategia Nacional de Largo Plazo. Ministerio de la Presidencia, 2021. https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2021/200521-Estrategia_Espana_2050.pdf

El aire, un nuevo carril en las ciudades

El desplazamiento aéreo en las ciudades, tan presentes en el imaginario de películas como *Blade Runner* o *Minority Report*, está cada vez más cerca de llegar a España.

La movilidad aérea innovadora será una realidad en pocos años. Vehículos como taxis y drones, autónomos o tripulados, transportarán personas y mercancías por el aire a través de un sistema de aeronaves VTOL, caracterizadas por su despegue y aterrizaje vertical. Estas aeronaves necesitarán de la construcción de una red capilar de vertipuertos para ser operadas, los cuales se convertirán en nodos estratégicos de conexión entre zonas urbanas, rurales y centros de logística.

El transporte en vertical liberará espacio en las ciudades y ayudará a reducir la congestión, haciendo también más eficiente la distribución de *última milla*. De hecho, la Agencia Europea de Seguridad Aérea estima que podría reducir el tiempo de desplazamiento en viajes urbanos habituales entre 15 y 40 minutos.

En los últimos años, se han hecho avances importantes para lograr su despliegue. En Dubai, a finales de 2024, se anunció el comienzo de la construcción del primer vertipuerto comercial del mundo. En Europa, países como Reino Unido o Países Bajos ya han hecho pruebas con taxis aéreos en sus ciudades. En nuestro país, estas mismas pruebas se han llevado a cabo en Santiago de Compostela en el marco del proyecto AMU-LED de la Comisión Europea, y el Clúster Español de Movilidad Aérea Innovadora (SIAM) acaba de publicar su Libro Blanco de Vertipuertos. En todo caso, su implantación todavía requiere del desarrollo de una normativa específica, y superar retos como la contaminación acústica y paisajística, la gestión con el tráfico aéreo convencional y la ciberseguridad.

Para más información, véase: Bustos Moreno (coord.), Yolanda. *Libro Blanco de Vertipuertos*. Asociación Española de Derecho Aeronáutico y Espacial, s. f. <https://aedae-aeroespacial.org/libro-blanco-de-vertipuertos-febrero-2025-vertiports-whitepaper-february-2025/>; EASA Pro. «What Is UAM | EASA». Accedido 25 de marzo de 2025. <https://www.easa.europa.eu/en/what-is-uam>; y Tramos. *Revista del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible*. «Vertipuertos, despegando hacia el mañana». 2024. https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/O6_vertipuertos_despegando_hacia_el_manana.pdf



| CAPÍTULO

03

Naturaleza como
sistema crítico

Seguros para proteger la naturaleza

Ante el aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, los seguros para ecosistemas han surgido como una herramienta clave para financiar la restauración de los espacios naturales. Hasta el momento, la mayoría se han centrado en cubrir daños en arrecifes y manglares debido al grado de desarrollo que tienen las herramientas utilizadas para cuantificar el impacto de eventos climáticos severos sobre estos ecosistemas. Su financiación suele realizarse a través de una colaboración entre el sector público (gobiernos locales) y el sector privado (empresas de las actividades económicas más expuestas, ONG, etc) de las zonas afectadas.

El primer ecosistema en asegurarse fue un tramo del Arrecife Mesoamericano (Quintana Roo) en 2019, con una póliza para su restauración en caso de tormentas severas. Un año después, cuando el huracán Delta golpeó México, el seguro se activó inmediatamente y se destinaron 850.000 dólares a reparar los daños. A diferencia de los

seguros tradicionales, los seguros de ecosistemas se activan automáticamente cuando se superan ciertos umbrales climáticos. Si un huracán o el viento alcanzan una intensidad determinada, la indemnización se realiza sin trámites adicionales. Gracias a este mecanismo, Belice inició la restauración de su arrecife pocos días después del huracán Lisa. Hawái también tiene aseguradas 81.580 hectáreas de sus arrecifes.

En Europa, todavía no se han implementado estos seguros pero ya existen varios proyectos que están investigando su viabilidad. En España, las praderas de posidonia, las marismas, los estuarios y las dunas costeras del Mediterráneo y el Atlántico podrían llegar a protegerse a través de estos mecanismos.

La naturaleza es un activo estratégico, y garantizar su valor a largo plazo, una garantía de nuestro bienestar futuro.

Fig. 9. Principales ecosistemas asegurados del mundo



Para más información, véase: Barragán (ed.), Andrés. *Insurance for Natural Infrastructure: Assessing the feasibility of insuring coral reefs in Florida and Hawai'i*. Bank of America y The Nature Conservancy, 2020. https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/TNC_BOA_ReefInsuranceFeasibility_FLHI_113020.pdf; NATURANCE. «Home». Accedido 4 de febrero de 2025. <https://www.naturanceproject.eu/>; Robles, Verónica García de León. «El seguro para el arrecife mesoamericano pasa su primera prueba». El País América, 2023. <https://elpais.com/america-futura/2023-09-14/el-seguro-para-el-arrecife-mesoamericano-pasa-su-primera-prueba.html>; y The Nature Conservancy. «Asegurar la naturaleza para garantizar un futuro resiliente». Accedido 4 de febrero de 2025. <https://www.nature.org/es-us/que-hacemos/nuestra-vision/perspectivas/asegurar-naturaleza-grantizar-futuro-resiliente/>

Superárboles contra el cambio climático

La ingeniería genética ha abierto la puerta a una nueva generación de árboles capaces de capturar y almacenar más CO₂ durante más tiempo. Técnicas recientes como CRISPR-Cas o la edición por bases permiten modificar el ADN de las plantas de forma precisa sin introducir material genético externo, lo que mejora su eficiencia fotosintética, acelera su crecimiento y favorece raíces más profundas que retienen carbono en el suelo por siglos.

La modificación genética de los árboles no es nueva, aunque, hasta hace poco, su aplicación se orientaba sobre todo a fines productivos. En 2015, Brasil aprobó el uso comercial de un eucalipto transgénico que crecía un 20 % más rápido y generaba más celulosa con el objetivo de aumentar la eficiencia en las plantaciones industriales. Ahora, estas técnicas más avanzadas de edición genética empiezan a usarse con fines climáticos: las plantas son sumideros de carbono, que absorben el CO₂ de la atmósfera -uno de los principales gases de efecto invernadero- durante el proceso de fotosíntesis, y lo almacenan en los troncos, las hojas, las raíces y el suelo.

Una iniciativa reciente en esta línea es el proyecto de *Living Carbon*, que ha desarrollado álamos

modificados para realizar la fotosíntesis con mayor eficiencia y descomponerse más lentamente. En laboratorio, algunos ejemplares produjeron un 53 % más de biomasa aérea (tronco, ramas y hojas) y almacenaron hasta un 27 % más de carbono que los árboles convencionales. Desde 2023, se han iniciado plantaciones piloto en el sureste de Estados Unidos, y se estudia su uso en suelos degradados como antiguas minas. Otro caso es el proyecto *Harnessing Plants* del Instituto Salk, que busca mejorar genéticamente especies vegetales para aumentar la producción de suberina, un compuesto natural que ralentiza la descomposición y permite fijar carbono en el suelo durante largos periodos de tiempo.

Aunque prometedora, esta innovación plantea desafíos importantes. Algunos expertos advierten sobre sus posibles efectos ecológicos como la propagación involuntaria de genes, la reducción de la biodiversidad o un mayor consumo de agua, lo que podría ser problemático en zonas con estrés hídrico. Ahora bien, gestionados con cautela, los superárboles podrían convertirse en una herramienta más para ampliar los sumideros de carbono y reforzar la lucha climática en el futuro.

Nota: CRISPR-Cas y la edición por bases son técnicas de edición genética desarrolladas en la última década. A diferencia de los métodos tradicionales, permiten modificar secuencias concretas del ADN de forma dirigida, rápida y sin necesidad de insertar genes de otras especies. Su precisión ha abierto nuevas posibilidades para mejorar funciones específicas en plantas. Para más detalle sobre estas técnicas, véase: Kim, Jin-Soo, y Jia Chen. «Base Editing of Organellar DNA with Programmable Deaminases». *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 25, n.º 1 (2024): 34–45. <https://doi.org/10.1038/s41580-023-00663-2>; y Tuncel, Aytug, Changtian Pan, Joshua S. Clem, Degao Liu, y Yiping Qi. «CRISPR-Cas Applications in Agriculture and Plant Research». *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 26, n.º 6 (2025): 419–41. <https://doi.org/10.1038/s41580-025-00834-3>

Para más información, véase: Boyce Upholt. «Inside the Quest to Engineer Climate-Saving “Super Trees”». MIT Technology Review. Accedido 5 de mayo de 2025. <https://www.technologyreview.com/2023/06/08/1074287/inside-the-quest-to-engineer-climate-saving-super-trees/>; «Brazil Approves Transgenic Eucalyptus». *Nature Biotechnology* 33, n.º 6 (2015): 577–577. <https://doi.org/10.1038/nbt0615-577c>; «Investigación - Instituto Salk de Estudios Biológicos». *Salk Institute for Biological Studies*, s. f. Accedido 5 de mayo de 2025. <https://www.salk.edu/es/iniciativa-de-aprovechamiento-de-las-plantas/la-investigaci%C3%B3n/>; Kim, Jin-Soo, y Jia Chen. «Base Editing of Organellar DNA with Programmable Deaminases». *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 25, n.º 1 (2024): 34–45. <https://doi.org/10.1038/s41580-023-00663-2>; Tao, Yumin, Li-Wei Chiu, Jacob W. Hoyle, et al. «Enhanced Photosynthetic Efficiency for Increased Carbon Assimilation and Woody Biomass Production in Engineered Hybrid Poplar». *Forests* 14, n.º 4 (2023). <https://doi.org/10.3390/f14040827>; Tuncel, Aytug, Changtian Pan, Joshua S. Clem, Degao Liu, y Yiping Qi. «CRISPR-Cas Applications in Agriculture and Plant Research». *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 26, n.º 6 (2025): 419–41. <https://doi.org/10.1038/s41580-025-00834-3>

Biominería: microorganismos para recuperar minerales críticos

La transición energética necesita materiales. Muchos. La Agencia Internacional de la Energía estima que, en una senda compatible con los objetivos climáticos, la producción de minerales necesarios para las tecnologías de energía limpia podría tener que multiplicarse por seis entre 2020 y 2040. Aumentar la extracción convencional a ese ritmo podría agravar impactos ambientales y sociales ya conocidos. De ahí el creciente interés por buscar otras formas de obtener esos materiales. Una de ellas se inspira en procesos que llevan miles de millones de años ocurriendo en la naturaleza: la interacción entre microorganismos y minerales.

Algunos microorganismos tienen la capacidad de interactuar con los minerales y transformar su composición química. Hoy, esa capacidad natural se está aprovechando en procesos industriales y experimentales para recuperar materias primas a partir de minerales con bajo contenido en metal, residuos mineros y otros materiales secundarios que los métodos convencionales tratan con dificultad, alto coste o baja rentabilidad. El proceso más habitual consiste en que bacterias, hongos o arqueas que favorecen la disolución de los minerales a través de su metabolismo, liberando los metales a una solución de la que después pueden extraerse. En determinados procesos, puede requerir menos energía que algunas técnicas convencionales.

No es una tecnología nueva ni experimental en todos sus usos. Lleva décadas aplicándose a escala industrial en la extracción de cobre, con operaciones consolidadas en Chile, Zambia, Australia o Irán. También se usa en el procesamiento de ciertos minerales como el oro. Pero el interés se ha extendido a otros metales cuya demanda está en aumento: níquel, cobalto, tierras raras, e incluso materiales presentes en baterías usadas y residuos electrónicos. Esta

última vía la conecta directamente con la economía circular: convertir lo que hoy es un pasivo ambiental en una fuente secundaria de materias primas.

Hay también líneas de investigación más especulativas. Una de ellas estudia la posible aplicación de la biominería en fondos oceánicos, donde se acumulan metales como manganeso o cobalto. Otra, a partir de un experimento realizado por la Agencia Espacial Europea en la Estación Espacial Internacional en 2019, sugiere que ciertos microorganismos podrían extraer tierras raras de rocas similares a las de la Luna o Marte. Son ideas lejos de cualquier aplicación práctica, pero ilustran hasta dónde puede llegar el campo.

La tecnología también tiene límites importantes. Los procesos biológicos suelen ser más lentos que los convencionales, los resultados de laboratorio no siempre escalan bien a entornos industriales, y la huella ambiental, aunque puede ser menor en condiciones controladas, no es nula. La gestión de efluentes ácidos o el uso de microorganismos modificados plantean preguntas técnicas, ambientales y regulatorias que aún requieren respuestas claras. Además, buena parte de los minerales críticos se concentra en países del Sur Global. Cómo se reparten los beneficios importa tanto como cómo funciona la técnica.

La biominería no va a desplazar a la minería convencional. Pero en un escenario de presión creciente sobre las materias primas, puede ser una herramienta útil dentro de una estrategia más amplia: aprovechar yacimientos que hoy no son viables, reducir residuos y recuperar materiales de fuentes secundarias. La capacidad de los microorganismos para transformar minerales empieza a ocupar un lugar propio en el debate sobre cómo obtener los materiales que necesita la transición energética.

Para más información, léase: Casas-Vargas, Julián C., Cristóbal Martínez-Bussenius, Álvaro Videla, y Mario Vera. «Novel Indigenous Strains and Communities with Copper Bioleaching Potential from the Amolanas Mine, Chile». *Minerals* 14, n.º 9 (2024): 867. <https://doi.org/10.3390/min14090867>; Cockell, Charles S., Rosa Santomartino, Kai Finster, et al. «Space station biomining experiment demonstrates rare earth element extraction in microgravity and Mars gravity». *Nature Communications* 11, n.º 1 (2020): 5523. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19276-w>; Dash, Jyotilagna, Ritesh Ojha, y Debabrata Pradhan. «Progress in bioleaching and its mechanism: a short review». *Discover Environment* 3, n.º 1 (2025): 238. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00454-w>; International Energy Agency (IEA). *Global Critical Minerals Outlook 2025 – Analysis*. International Energy Agency (IEA), 2025. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>; Li, Chengcheng, Huameng Ge, Wenhao Huang, et al. «Vertically stratified microbial diversity and keystone species driving element cycling in the Magellan seamount sediments». *Microbial Genomics* 11, n.º 12 (2025). <https://doi.org/10.1099/mgen.0.001493>; Tezyapar Kara, I., K. Kremser, S. T. Wagland, y F. Coulon. «Bioleaching metal-bearing wastes and by-products for resource recovery: a review». *Environmental Chemistry Letters* 21, n.º 6 (2023): 3329–50. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01611-4>; Thiagarajulu, Nathiya, Divya Yuvaraj, P. Gopinathan, et al. «Assessment on Sustainable Biomining: Integrating Environmental Responsibility and Economic Viability». *Land Degradation & Development* 37, n.º 1 (2026): 3–27. <https://doi.org/10.1002/ldr.70107>; Turner, James Morton. «The matter of a clean energy future». *Science* 376, n.º 6600 (2022). <https://doi.org/10.1126/science.add5094>

Abonos sin fósiles

A pesar de los avances en el desarrollo de la agricultura ecológica de las últimas décadas, el campo europeo sigue dependiendo de un insumo difícil de reemplazar: el amoníaco. Sin él, no se podrían fabricar los fertilizantes que sostienen cerca del 90 % de la producción agrícola europea. El problema es cómo se produce: un proceso altamente intensivo en energía, basado en combustibles fósiles que, a escala global, consume cerca del 2 % de la energía primaria y genera el 1,5 % de las emisiones de CO₂.

Nuevas tecnologías buscan redefinir la forma en que se realiza este compuesto con el objetivo de avanzar hacia una industria más limpia y resiliente. Estas innovaciones actúan sobre las dos fases clave del proceso de obtención del amoníaco: la generación de hidrógeno y la fijación del nitrógeno atmosférico. Ambos pasos, tal y como se realizan en el modelo tradicional, dependen del gas natural, lo que aumenta la huella ecológica del sector, expone a Europa a una fuerte dependencia de recursos importados y debilita su autonomía estratégica.

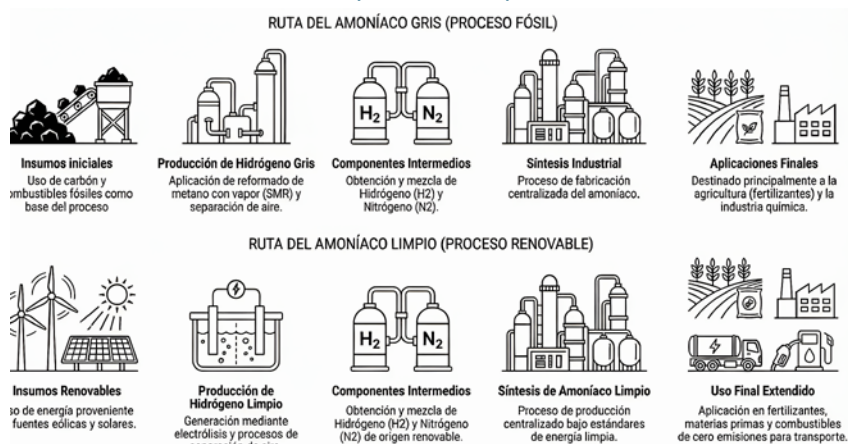
En la primera etapa, dedicada a la producción de hidrógeno, la tecnología más prometedora es la electrólisis del agua, que permite separar las moléculas de hidrógeno y oxígeno presentes en el agua utilizando electricidad generada a partir de energías renovables en lugar de gas natural. En la segunda etapa, se está avanzando

en la modernización del proceso de fijación del nitrógeno (Haber-Bosch) mediante, por ejemplo, soluciones basadas en el uso de la luz visible para activar el proceso químico entre el nitrógeno y un catalizador de molibdeno. La clave reside en desarrollar soluciones que permitan la producción descentralizada de amoníaco, en entornos con acceso directo a las energías renovables, y en los que sea posible almacenar o transformar este compuesto en fertilizante.

En paralelo, se están desarrollando enfoques biológicos que aprovechan bacterias y enzimas modificadas para replicar -y optimizar- la fijación natural del nitrógeno realizada por algunas plantas. Estos microorganismos pueden liberar amoníaco directamente en el sustrato, reduciendo significativamente la dependencia de fertilizantes sintéticos.

Descarbonizar la producción de abonos es una apuesta estratégica para transformar el modelo agrícola, garantizar la seguridad alimentaria y avanzar hacia un sistema agrario más sostenible. Pero la solución no pasa solo por la tecnología: requiere de un cambio en las formas de cultivar, gestionar los nutrientes y optimizar el uso de insumos, integrando prácticas agronómicas que reduzcan la dependencia de fertilizantes sintéticos y mejoren la eficiencia del sistema productivo en su conjunto.

Fig. 10. Proceso elaboración del amoníaco. Imagen realizada con Inteligencia Artificial, inspirada en esquema de Ammobia Inc.



Para más detalle, véase: Center for the Fourth Industrial Revolution. *Top 10 Emerging Technologies of 2025*. Flagship Report. World Economic Forum, 2025. https://reports.weforum.org/docs/WEF_Top_10_Emerging_Technologies_of_2025.pdf; Oficina Nacional de Prospectiva y Estrategia (coord.). *Resilient EU2030. A future-oriented approach to reinforce the EU's Open Strategic Autonomy and Global Leadership*. Ministerio de la Presidencia, 2023. <https://futuros.gob.es/sites/default/files/2023-09/RESILIENTEU2030.pdf>; Sagues, William J., Camilla A. Assis, Phillip Hah, et al. «Decarbonizing Agriculture through the Conversion of Animal Manure to Dietary Protein and Ammonia Fertilizer». *Bioresource Technology* 297 (2020): 122493. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122493>; Santos, Andreia F., Patrícia V. Almeida, Paula Alvarenga, Licínio M. Gando-Ferreira, y Margarida J. Quina. «From wastewater to fertilizer products: Alternative paths to mitigate phosphorus demand in European countries». *Chemosphere* 284 (2021): 131258. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131258>; y World Economic Forum. «What Is Nitrogen Fixation, and How Can We Make It More Sustainable?» 2025. <https://www.weforum.org/stories/2025/06/nitrogen-fixation-sustainable-fertilizer-tech/>

Los hongos como frontera estratégica

Los hongos desempeñan un papel estructural en el funcionamiento de los ecosistemas y de los microbiomas asociados a través de redes de interacción que condicionan procesos biogeoquímicos, agrícolas y sanitarios. Sin embargo, su función en estas interacciones ecológicas sigue estando insuficientemente caracterizada¹, lo que limita la capacidad para anticipar sus riesgos y aprovechar su potencial.

En este contexto, la biología fúngica se encuentra en un punto de inflexión: una brecha histórica de conocimiento empieza a ser abordable gracias a los avances en genética, genómica y biotecnología. Este cambio de fase sitúa a los hongos como un ámbito estratégico para la ciencia, la salud y la bioseguridad, con aplicaciones como el desarrollo de biocombustibles, la identificación de nuevos compuestos con potencial preventivo y terapéutico o la producción de enzimas e ingredientes funcionales.

Además de nuevas oportunidades estratégicas asociadas a los hongos, existen riesgos sanitarios y alimentarios emergentes. En salud pública, la aparición de cepas multirresistentes pone de relieve la posibilidad, hasta hace poco considerada remota, de crisis sanitarias de origen fúngico². Estos riesgos no se limitan a la infección humana directa, sino que pueden amplificarse a través de alteraciones ecológicas. En el ámbito agrícola, los hongos representan una amenaza creciente para cultivos clave a escala global, con pérdidas de rendimiento potenciales de hasta el 20 %, lo que introduce riesgos relevantes para la seguridad alimentaria.

Frente a estos riesgos, los avances tecnológicos están redefiniendo las capacidades de análisis y respuesta. Las aproximaciones metagenómicas permiten acceder a la diversidad fúngica más allá

de las especies cultivables y están contribuyendo a reconstruir su historia evolutiva. De manera complementaria, herramientas de edición genética como CRISPR-Cas facilitan caracterizaciones funcionales más precisas, mientras que las técnicas avanzadas de imagen y el desarrollo de modelos experimentales están mejorando la comprensión de las interacciones entre hongos y otros organismos. Integrados en un enfoque *One Health*, estos avances están ampliando el abanico de soluciones preventivas, diagnósticas y terapéuticas, incluyendo el desarrollo de nuevas vacunas y clases innovadoras de antifúngicos.

La consolidación de este ámbito de conocimiento como prioridad estratégica requiere infraestructuras científicas y técnicas específicas, como biobancos y repositorios de muestras, así como una integración efectiva entre biología, genómica, ciencia de datos, inteligencia artificial y modelización computacional. En España, ya se está avanzando a través de líneas de investigación desarrolladas por el CSIC, el Instituto de Salud Carlos III y diversas universidades, con contribuciones relevantes en diversidad fúngica, caracterización genómica y aplicaciones biotecnológicas.

La evolución reciente de los sistemas fúngicos, unida a las limitaciones actuales de conocimiento, confirma que la biología fúngica ha dejado de ser un ámbito marginal para convertirse en una frontera estratégica. Ignorar estas señales implica asumir riesgos crecientes para la salud, la seguridad alimentaria y la estabilidad de los ecosistemas; abordarlas abre, por el contrario, una ventana de oportunidad con implicaciones de largo alcance para la resiliencia, la innovación y la capacidad de respuesta frente a desafíos emergentes.

Nota:

¹ Se estima que existen entre 1,5 y 2,8 millones de hongos de los cuales tan solo se ha secuenciado, al menos parcialmente, el genoma de unas 25.000 especies.

² Los riesgos para la salud asociados a los hongos son amplios. Por ejemplo, cepas multirresistentes como *Candida auris* junto con hongos cosmopolitas como *Aspergillus fumigatus* han contribuido a un aumento de las infecciones fúngicas invasivas. Además, otras especies del género *Alternaria* o *Curvularia* han aumentado la emergencia de patógenos "transreino".

Para más detalle, véase: Antonelli, A., C. Fry, R. J. Smith, et al. «State of the World's Plants and Fungi, 2023.» *Royal Botanic Gardens, Kew*, 2023. <https://kew.royalbotanicgardens.org/concern/reports/fccd9838-42a9-401f-a518-e76142164193>; Case, Nicola T., Sarah J. Gurr, Matthew C. Fisher, et al. «Fungal Impacts on Earth's Ecosystems». *Nature* 638, n.º 8049 (2025): 49–57. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08419-4>; Dadachova, Ekaterina, Ruth A. Bryan, Xianchun Huang, et al. «Ionizing Radiation Changes the Electronic Properties of Melanin and Enhances the Growth of Melanized Fungi». *PLOS One* 2, n.º 5 (2007): e457. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000457>; European Centre for Disease Prevention and Control. «One Health: EU Agencies Unite to Tackle Azole Fungicide Resistance in Aspergillus Fungi». 2025. <https://www.ecdc.europa.eu/en/news-events/one-health-eu-agencies-unite-tackle-azole-fungicide-resistance-aspergillus-fungi>; Fisher, Matthew C., Nichola J. Hawkins, Dominique Sanglard, y Sarah J. Gurr. «Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security». *Science* 360, n.º 6390 (2018): 739–42. <https://doi.org/10.1126/science.aap7999>; Gesda. *Gesda 2026 Science Breakthrough Radar*. Geneva Science and Diplomacy Anticipator's Annual Report on Science Trends at 5, 10 and 25 Years. GESDA, 2026. <https://radar.gesda.global/2026.pdf>; y Hill, Jennifer Hampton, Rickesha Bell, Logan Barrios, et al. «Neonatal fungi promote lifelong metabolic health through macrophage-dependent β cell development». *Science* 387, n.º 6738 (2025): eadn0953. <https://doi.org/10.1126/science.adn0953>; Ministerio de Sanidad. *Informe de evaluación del sistema de alerta precoz y respuesta rápida del Sistema Nacional de Salud*. Informes, Estudios e Investigación. Ministerio de Sanidad, s. f. https://www.sanidad.gob.es/areas/alertasEmergenciasSanitarias/vigilancia/docs/Informe_Sistema_de_Alerta_Precoz_y_Respuesta_Rapida_SNS_2023.pdf; Secretaría General de Salud Digital, Información e Innovación del Sistema Nacional de Salud. *Estrategia de Inteligencia Artificial para el Sistema Nacional de Salud*. Ministerio de Sanidad, 2025. https://www.sanidad.gob.es/areas/saludDigital/doc/elASNS_v13.pdf; Motamedi, Sina, Daniel R. Rousse, y Geoffrey Promis. «A Review of Mycelium Bio-Composites as Energy-Efficient Sustainable Building Materials». *Energies* 18, n.º 16 (2025). <https://doi.org/10.3390/en18164225>; y Stukenbrock, Eva, y Sarah Gurr. «Address the Growing Urgency of Fungal Disease in Crops». *Nature* 617, n.º 7959 (2023): 31–34. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-01465-4>



| CAPÍTULO

04

Materiales y ener- gía renovada

Paneles solares convertidos en bateas

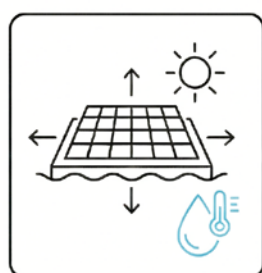
Cada año, las altas temperaturas y la radiación solar evaporan millones de litros de agua de los embalses españoles. Los paneles solares flotantes ofrecen una solución innovadora para limitar este efecto. Al crear una capa de sombra sobre el agua, los paneles disminuyen la exposición al sol y contribuyen a la conservación de este recurso. Además, su ubicación en entornos acuáticos mejora su eficiencia, ya que operan a temperaturas más estables y evitan la acumulación de polvo, superando en rendimiento a los paneles convencionales en tierra firme.

Países como Francia, Portugal o Países Bajos ya están apostando por esta tecnología. En nuestro país, el embalse de Sierra Brava en Extremadura fue el escenario del primer proyecto piloto de planta fotovoltaica flotante conectada a la red en 2020. Se estima que disponemos de al menos

100 embalses estatales donde se podrían instalar estos paneles. De hecho, en 2024, se aprobó un marco regulador para facilitar su despliegue, pero limitando su extensión a un máximo del 15 % de la superficie del embalse y estableciendo controles medioambientales que eviten el deterioro de las aguas y sus ecosistemas.

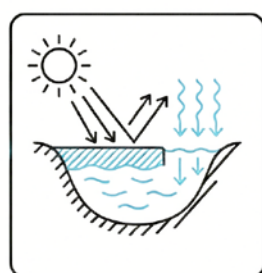
Sin embargo, la innovación no se detiene aquí. Los paneles flotantes también se pueden utilizar para desarrollar la acuicultura. En China, ya lo están haciendo para cultivar especies como los pepinos de mar. ¿Y si en el futuro en España hiciéramos lo mismo? Podríamos instalar plataformas solares que, además de producir electricidad renovable, faciliten la cría de mejillones y ostras, uniendo ahorro de agua, energía limpia y acuicultura sostenible en un solo espacio.

Fig. 11. Fotovoltaica flotante: beneficios sistémicos y marco regulatorio en España



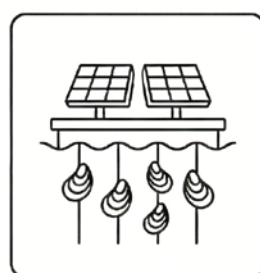
Eficiencia térmica y energética superior.

El entorno acuático mantiene temperaturas estables y reduce el polvo, superando el rendimiento de los paneles terrestres.



Conservación crítica del recurso hídrico.

La capa de sombra generada sobre el agua reduce drásticamente la evaporación provocada por la radiación solar.



Sinergia con acuicultura sostenible.

Las plataformas pueden funcionar como "bateas" para la cría de especies como ostras, uniendo energía limpia y alimentos.



Despliegue regulado en España.

La normativa actual limita la instalación a un máximo del 15% de la superficie del embalse para proteger el ecosistema.

Léase la información en: Acciona. «Planta fotovoltaica flotante Sierra Brava | ACCIONA | Business as unusual». Accedido 17 de marzo de 2025. <https://www.acciona.com/es/proyectos/planta-fotovoltaica-flotante-sierra-brava>; Guo, Shuang, Zhenglin Yu, Chaowei Hou, et al. «Integrating photovoltaic with sea cucumber aquaculture: Environmental impacts and holothurian digestion and aestivation». *Aquaculture Reports* 41 (2025): 102686. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2025.102686>; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. «El Gobierno aprueba el real decreto que regula la instalación de plantas fotovoltaicas flotantes en embalses en el dominio público hidráulico». Accedido 17 de marzo de 2025. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2024/julio/el-gobierno-aprueba-el-real-decreto-que-regula-la-instalacion-de.html>; Nora. «Spain MMOI – The Mar Menor Oyster Initiative – NORA». Accedido 17 de marzo de 2025. <https://nora-europe.eu/spain-the-mar-menor-oyster-initiative/>; TNO. Innovation for Life. «Floating Solar». Accedido 17 de marzo de 2025. <https://www.tno.nl/en/sustainable/energy-supply/solar-applications/floating-solar-panels/>; y Vidović, V., G. Krajačić, N. Matak, G. Stunjek, y M. Mimica. «Review of the potentials for implementation of floating solar panels on lakes and water reservoirs». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 178 (2023): 113237. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113237>

De los edificios pasivos a las ciudades productivas

¿Y si cada paso que damos pudiera iluminar una farola? ¿Y si una ventana no solo dejase pasar la luz, sino que también la capturase para transformarla en energía? Las ciudades del futuro no solo consumirán electricidad: también la generarán a través de su arquitectura, movilidad y vida cotidiana. Esto será posible gracias a la microgeneración distribuida, mediante la cual dispositivos pequeños producen electricidad cerca del punto de consumo, reduciendo la dependencia de grandes infraestructuras y las pérdidas por transporte, y mejorando la resiliencia del sistema.

Algunas tecnologías emergentes ya permiten aprovechar el movimiento de personas y vehículos para producir energía. Por ejemplo, existen baldosas que convierten cada pisada en electricidad, y badenes que generan corriente con el paso de los coches. Aunque la energía generada por unidad es modesta, estos dispositivos pueden alimentar el alumbrado o la señalización en espacios muy transitados como estaciones, colegios o carreteras, reduciendo la carga sobre la red convencional.

Otra vía prometedora es el uso de vehículos eléctricos como fuentes móviles de energía. La tecnología bidireccional (*Vehicle-to-Grid*) permite que estos vehículos devuelvan electricidad a la red en momentos de alta demanda. Países como Francia, Estados Unidos o Japón han desarrollado pilotos con flotas públicas o privadas, y en España comienzan a explorarse estas soluciones en entornos urbanos.

La generación energética integrada en elementos arquitectónicos también avanza a través de ventanas con vidrios fotovoltaicos capaces de capturar radiación ultravioleta e infrarroja. En un futuro, fachadas enteras podrían contribuir a la autosuficiencia energética de los edificios.

Estas innovaciones anuncian un modelo urbano más eficiente y descentralizado, donde las ciudades dejan de ser consumidoras pasivas para convertirse en organismos energéticos vivos capaces de autoabastecerse.

Para más información, véase: Acciona. «ACCIONA Energía crea la primera red de carga bidireccional de vehículos eléctricos en España». Accedido 12 de junio de 2025. <https://www.acciona.com/es/actualidad/noticias/acciona-energia-crea-primera-red-carga-bidireccional-vehiculos-electricos-espana>; Black, Douglas, Jason MacDonald, Nicholas DeForest, y Christoph Gehbauer. *Los Angeles Air Force Base Vehicle-to-Grid Demonstration: Final Project Report*. Final Project Report. Lawrence Berkely National Laboratory, 2020. <https://escholarship.org/uc/item/3f57m6g9>; Electrify. «Renault y The Mobility House lanzan un proyecto V2G en Francia - electrify.com». Infraestructura. Electrify, 22 de octubre de 2024. <https://www.electrify.com/es/2024/10/22/renault-y-la-casa-de-la-movilidad-lanzan-el-proyecto-v2g-en-francia/>; Moussa, Rania Rushdy, Walaa S. E. Ismaeel, y Madonna Makram Solban. «Energy generation in public buildings using piezoelectric flooring tiles; A case study of a metro station». *Sustainable Cities and Society* 77 (2022): 103555. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103555>; Saba, Hugo, Filipe Cardoso Brito, Rafael Guimarães Oliveira dos Santos, et al. «The Potential Related to Microgeneration of Renewable Energy in Urban Spaces and Its Impact on Urban Planning». *Energies* 17, n.º 23 (2024). <https://doi.org/10.3390/en17236018>; y Zhang, Chengquan, Hiroshi Kitamura, y Mika Goto. «Feasibility of vehicle-to-grid (V2G) implementation in Japan: A regional analysis of the electricity supply and demand adjustment market». *Energy* 311 (2024): 133317. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133317>

De la madera transparente al ADN de salmón: la revolución energética de los nuevos materiales

El clima de la España de 2050 será mucho más cálido y con mayor estrés hídrico que el de hoy, y con fenómenos extremos más frecuentes. Las temperaturas medias aumentarán y, en muchas zonas, las precipitaciones tenderán a ser menores en promedio y más concentradas en episodios intensos; los veranos serán más largos y las sequías más probables. En el sector de la construcción, ya se están probando nuevos materiales que mejoran la eficiencia energética de los edificios y facilitan la adaptación del parque residencial a un clima más exigente. Estos materiales buscan no solo aislar mejor, sino también interactuar de forma más eficaz con la radiación solar y el intercambio de calor, reduciendo la demanda de calefacción y refrigeración.

La madera transparente y el aerogel de ADN de salmón son dos ejemplos prometedores y muy representativos de esta línea de innovación. La madera transparente se obtiene modificando la estructura natural de la madera para reducir los compuestos que absorben la luz y rellenar su microestructura con materiales transparentes, de modo que conserva buena resistencia mecánica, deja pasar la luz y puede aislar mejor que el vidrio convencional. Esto abre la puerta a ventanas o fachadas que aprovechen la luz natural y ayuden

a reducir pérdidas de calor en invierno y, con un buen diseño de control solar, también parte de la carga térmica en verano, mejorando el confort interior con menor demanda energética.

Por su parte, los materiales “súper refrescantes” como el aerogel de ADN de salmón están diseñados para enfriar superficies sin consumir energía. Funcionan reflejando gran parte de la radiación solar y liberando calor en forma de radiación térmica, lo que en determinadas condiciones puede hacer que una superficie se mantenga más fría que el aire que la rodea incluso bajo luz solar directa. Además, al fabricarse a partir de subproductos de la industria pesquera, podrían contribuir a modelos de economía circular en los que residuos industriales se convierten en materiales útiles para la construcción. Aun así, antes de su uso generalizado será necesario comprobar su durabilidad real y confirmar su impacto ambiental total, ya que dependerá de cómo se fabriquen y de cuánto tiempo duren en uso.

En conjunto, estos materiales muestran el potencial de transformar la eficiencia energética de los edificios, aunque su impacto real dependerá de su rendimiento demostrado en condiciones reales y de su viabilidad a gran escala.

Para más detalle, consúltese: Hall, Shannon. «The Cool Technologies That Could Protect Cities from Dangerous Heat». *Nature* 632, n.º 8027 (2024): 971–73. <https://doi.org/10.1038/d41586-024-02760-4>; y Xia, Qinqin, Chaoji Chen, Tian Li, et al. «Solar-assisted fabrication of large-scale, patternable transparent wood». *Science Advances* 7, n.º 5 (2021): eabd7342. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd7342>



| CAPÍTULO

05

Mundos repro-
gramables

Puzzles y moldes para pasteles hechos en casa: las posibilidades de las impresoras 3D del futuro

Imprimir en casa la pieza de una lavadora estropeada o de un LEGO puede ser una realidad en las próximas décadas. Desde su aparición a finales de los ochenta, las impresoras 3D han evolucionado hasta convertirse en una de las tecnologías más prometedoras para la fabricación de bienes. Aunque todavía se trata de una tecnología relativamente joven, su aplicación a sectores como el de la construcción –en Japón, se construyó una estación de tren impresa en 3D en menos de seis horas–, el automovilístico, el aeroespacial, el farmacéutico o el alimentario ya está permitiendo ganancias importantes de eficiencia y una mayor personalización de los productos.

En el campo de la medicina, su potencial también es grande. A día de hoy, estas impresoras se emplean principalmente para la creación de implantes y prótesis a medida, pero en los próximos años se espera que avancen hacia la bioimpresión de tejidos vivos funcionales capaces de integrarse en nuestro cuerpo. Si se desarrollan con éxito, facilitarán el tratamiento de lesiones complejas o enfermedades degenerativas mediante la restauración de órganos, huesos y otros tejidos biológicos.

Ahora bien, la innovación de estas impresoras no se limita solo a la mejora de los procesos de producción. Va más allá. Puede ayudar a la descentralización de las cadenas de fabricación, acercando fabricantes y consumidores, y hacerse poco a poco más comunes en los hogares como sucedió con las televisiones y los ordenadores en el pasado. Hasta el momento, su ubicación se ha concentrado en unos pocos países debido a las economías de escala y la necesidad de personal especializado. Esta tendencia podría cambiar si se acelera la fragmentación de las cadenas internacionales de suministro. Mientras que el comercio de bienes físicos está sujeto a aranceles, restricciones logísticas y tiempos de entrega, los archivos de diseño digital pueden compartirse al instante de una punta a otra del globo. En el caso de su uso para fines domésticos, las posibilidades que ofrecen son múltiples: desde la reparación de electrodomésticos y muebles, a la creación de juguetes, la impresión de comida o el desarrollo de proyectos escolares. Frente al transporte de mercancías, la huella ambiental de compartir un archivo descargable listo para imprimir será también bastante menor.

Para más información, véase: Andrea Andrenelli y Javier Lñopez-González. *3D Printing and International Trade*. OECD Trade Policy Paper No. 256. OECD Publishing, 2021. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/11/3d-printing-and-international-trade_3bcc6805/0de14497-en.pdf; Freund, Caroline, Alen Mulabdic, y Michele Ruta. «Is 3D printing a threat to global trade? The trade effects you didn't hear about». *Journal of International Economics* 138 (2022): 103646. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2022.103646>; Mateo, Nieves Cubo. «3D-printed grafts: shaping the future of bone and tissue regeneration». *The Conversation*, 2025. <https://doi.org/10.64628/AAO.js7fv54g6>; Notoya, Kiuko, y Noriko Hayashi. «How Japan Built a 3D-Printed Train Station in 6 Hours». *World. The New York Times*, 2025. <https://www.nytimes.com/2025/04/08/world/asia/japan-3d-station.html>; Oficina Nacional de Prospectiva y Estrategia (coord.). *Resilient EU2030. A future-oriented approach to reinforce the EU's Open Strategic Autonomy and Global Leadership*. Ministerio de la Presidencia, 2023. <https://futuros.gob.es/sites/default/files/2023-09/RESILIENTEU2030.pdf>; y Rifkin, Jeremy. «Gracias a la impresión 3D, la era de los aranceles tiene los días contados». Opinión. *El País*, 2025. <https://elpais.com/opinion/2025-04-01/gracias-a-la-impresion-3d-la-era-de-los-aranceles-tiene-los-dias-contados.html>

Cuando tu gemelo es digital

¿Qué pasaría si se peatonalizase la arteria principal de una ciudad? ¿Y si se soterrase la red ferroviaria o se levantase un nuevo barrio? Hasta ahora, no éramos capaces de determinar con precisión las consecuencias de una intervención pública de este calado. En poco tiempo, en cambio, será impensable tomar una decisión en el mundo real sin haberla probado antes en el entorno virtual.

Espacios, ciudades y territorios pueden tener gemelos digitales: maquetas virtuales que simulan el comportamiento de su equivalente en el mundo real. Estas maquetas, posibles gracias a la combinación del Internet de las cosas y la inteligencia artificial, permiten anticipar posibles problemas y ensayar diferentes soluciones. El Mar Menor, la ciudad de Barcelona y hasta países como Singapur ya tienen su gemelo digital.

Aunque fueron concebidos originalmente para replicar la realidad física, han comenzado a utilizarse para gestionar integralmente ciudades

y territorios, facilitando una gestión más eficiente de los recursos y las redes de transporte. Sin embargo, sus ventajas no se reducen solo a su capacidad para replicar infraestructuras físicas. Las dinámicas socioeconómicas provocan contaminación, segregación espacial o dificultades en el acceso a la vivienda, y los gemelos digitales pueden servir para realizar pruebas piloto de qué políticas públicas son más recomendables en cada caso. Por ejemplo, el gemelo digital de Zaragoza se ha utilizado para identificar las islas de calor y los hogares vulnerables de la ciudad, y así probar qué políticas medioambientales y sociales funcionan mejor en esas áreas.

Ahora bien, como en otras aplicaciones de la inteligencia artificial, será fundamental evitar que los datos y algoritmos que se incorporen a las simulaciones reproduzcan o amplifiquen brechas ya existentes. Los gemelos digitales deberán ser éticos para que realmente nos ayuden a mejorar la gobernanza de nuestras ciudades y territorios.

Para más detalle, véase: Latorre, Lucia, Eduardo Rego, Lorenzo De Leo, y Mariana Gutierrez. «Tech Report: Digital Twins». *IDB Publications*, advance online publication, 2024. Latin America. <https://doi.org/10.18235/0013166>; Michael batty. *Digital Twins in City Planning*. Working Paper Series No. 237. UCL Centre for Advanced Spatial Analysis, 2023. https://www.ucl.ac.uk/bartlett/sites/bartlett/files/casa_working_paper_237.pdf; Observatory of Public Sector Innovation. «vCity, a Human-Centric Platform for Urban Digital Twins». *Observatory of Public Sector Innovation*, Accedido 2 de junio de 2025. <https://oecd-opsi.org/innovations/vcity-a-human-centric-platform-for-urban-digital-twins/>; Observatory of Public Sector Innovation. «Virtual Singapore - Singapore's Virtual Twin». *Observatory of Public Sector Innovation*, Accedido 2 de junio de 2025. <https://oecd-opsi.org/innovations/virtual-twin-singapore/>; Oficina Nacional de Prospectiva y Estrategia (coord.). *HispanIA 2040. Cómo la Inteligencia Artificial Mejorará Nuestro Futuro*. Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes, 2025. <https://futuros.gob.es/sites/default/files/2025-03/HispanIA-2040.pdf>; y Zaragoza Noticias. «El Ayuntamiento de Zaragoza completa su primer gemelo digital destinado a medir la vulnerabilidad en toda la ciudad. Noticia. Ayuntamiento de Zaragoza». *Zaragoza Noticias*. Accedido 2 de junio de 2025. <https://www.zaragoza.es/sede/servicio/noticia/337847>

Criptografía post cuántica: cómo proteger nuestra información en el futuro

Casi todo lo que hacemos en internet está protegido por sistemas de seguridad digital: desde enviar un mensaje por WhatsApp hasta hacer una transferencia bancaria o guardar nuestras fotos en la nube. Esta protección se basa en fórmulas matemáticas que son muy difíciles de romper, al menos para los ordenadores actuales. Sin embargo, el avance de la computación cuántica está abriendo una nueva era en la tecnología. Los ordenadores cuánticos, gracias a su capacidad para procesar información de manera mucho más eficiente que los tradicionales, están impulsando una transformación en el ámbito de la ciberseguridad.

La llamada criptografía post cuántica (PQC) busca desarrollar nuevos métodos de seguridad diseñados para proteger la información incluso frente a la potencia de los ordenadores cuánticos. Lo hacen, por ejemplo, perfeccionando y estandarizando algoritmos como el *CRYSTALS-Kyber* para el intercambio seguro de claves.

El próximo estándar de seguridad digital será una carrera contrarreloj para actualizar la ciberseguridad global antes de que el cifrado actual quede obsoleto, especialmente en sectores críticos como la banca, la defensa o la salud, que necesitan garantizar la confidencialidad de sus datos a lo largo del tiempo.

Organizaciones internacionales como el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) ya impulsan un nuevo marco de ciberseguridad, y proyectos como *Open QKD* o *PROMETHEUS* buscan establecer estándares abiertos y seguros para la era post cuántica, combinando esfuerzos académicos, industriales y gubernamentales. En España, iniciativas como el proyecto *Quantum Spain* o la Estrategia Española de Tecnologías Cuánticas 2025-2030 muestran que este camino será un pilar fundamental del futuro digital que ya se está empezando a construir.

Fig.12. Criptografía post cuántica



Para más información, véase: Federal Office for Information Security. «Post-Quantum Cryptography». Deutschland Digital Sicher BSI. Accedido 16 de junio de 2025. <https://www.bsi.bund.de/EN/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Quantentechnologien-und-Post-Quanten-Kryptografie/Post-Quanten-Kryptografie/post-quanten-kryptografie.html?nn=909240>; Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública. «Quantum Spain – El impulso definitivo al ecosistema de computación cuántica de España». Quantum Spain. Accedido 16 de junio de 2025. <https://quantumspain-project.es/>; NIST. «NIST Releases First 3 Finalized Post-Quantum Encryption Standards». NIST, 2024. <https://www.nist.gov/news-events/news/2024/08/nist-releases-first-3-finalized-post-quantum-encryption-standards>; OpenQKDNetwork. «OpenQKDNetwork». OpenQKDNetwork. Accedido 16 de junio de 2025. <https://www.openqkdnetwork.net>; Orange. «Prometheus Has Brought Post-Quantum Cryptography to Humanity». Hello Future, 2023. <https://hellofuture.orange.com/en/prometheus-has-brought-post-quantum-cryptography-to-humanity/>; y World Economic Forum. «US Unveils New Tools to Withstand Encryption-Breaking Quantum». World Economic Forum, 27 de agosto de 2024. <https://www.weforum.org/stories/2024/08/us-tools-encryption-breaking-quantum-computing-nist/>

La privacidad mental como nueva frontera digital

Llevamos años discutiendo quién controla nuestros datos. La siguiente pregunta es más interesante: ¿quién controla lo que pasa dentro de tu cabeza, y bajo qué reglas?

Auriculares que miden tu atención. Dispositivos que detectan tu estado emocional. Interfaces que leen actividad cerebral para adaptar anuncios, evaluar empleados o diagnosticar enfermedades digitales. Impulsada por la convergencia entre neurociencia, sensores e Inteligencia Artificial (IA), la neurotecnología está saliendo de hospitales y laboratorios para extenderse al bienestar, la educación, el trabajo y el entretenimiento. El resultado es una nueva categoría de información especialmente sensible por su capacidad para acceder, inferir e incluso influir sobre pensamientos, emociones y estados cognitivos: los neurodatos. Y el mercado ya lo refleja, el sector se acerca a los 20.000 millones de dólares en 2026, creciendo al 14 % anual.

Lo que hace a los neurodatos diferentes no es solo lo que pueden revelar, sino también lo que pueden llegar a modificar. Por un lado, el cerebro funciona como un identificador biométrico único, tan singular como una huella dactilar o un perfil genético, con capacidad para revelar información que el propio individuo desconoce sobre sí mismo. Por otro, la neurotecnología no es una tecnología de solo lectura: el mismo interfaz que recoge datos puede generar estímulos que alteren la actividad cerebral y modifiquen el comportamiento. En combinación con la IA, esta capacidad puede volverse cada vez más precisa, adaptativa y personalizada, ajustándose a las características, respuestas o estados mentales de cada individuo. No existe un precedente claro de una tecnología capaz de observar y, al mismo tiempo, intervenir sobre los procesos mentales, lo que plantea desafíos inéditos para la autonomía individual, la gobernanza tecnológica y la protección de los derechos fundamentales.

El debate regulatorio se articula en torno a tres ideas: proteger los neurodatos como información sensible, evitar su uso para manipular decisiones, y garantizar que nadie pueda alterar la identidad cognitiva de alguien sin consentimiento. El movimiento es global pero desigual. Chile fue pionero al reconocer protecciones específicas a nivel constitucional. En EE.UU., la regulación avanza principalmente por iniciativa de los estados. Colorado y California ya consideran los neurodatos información biológica sensible, mientras que a nivel federal la gobernanza sigue siendo predominantemente voluntaria. En China, la neurotecnología se desarrolla bajo una estrategia que combina aplicaciones civiles y militares.

En Europa, el debate se ha orientado menos hacia la creación de nuevos derechos y más hacia la posibilidad de adaptar los marcos existentes de protección de datos, IA y derechos fundamentales a los desafíos planteados por la neurotecnología. El AI Act ya prohíbe el reconocimiento emocional en entornos laborales y la manipulación subliminal, y España participa activamente de esa apuesta: la Carta de Derechos Digitales de 2021 fue uno de los primeros textos institucionales europeos en abordar la libertad cognitiva, y en 2025 Cantabria presentó el primer anteproyecto europeo con protección legal explícita para neurodatos. En un contexto donde los estándares aún no han convergido globalmente, la capacidad de influir en cómo se regula esta tecnología es también una cuestión de posicionamiento estratégico.

La protección de los datos personales tardó años en consolidarse y acabó cristalizando en marcos como el GDPR europeo, hoy referencia internacional. Con los neurodatos, el reto será anticiparse: desarrollar mecanismos de gobernanza antes de que las capacidades tecnológicas se extiendan más rápido que las normas destinadas a regularlas.

Para más información, léase: Brazal, Arturo, Francesca Pesce, Marta Beltrán, y Xabier Lareo. *Neurodatos*. Agencia Española de Protección de Datos, 2024. <https://www.aepd.es/guias/neurodatos-aepd-edps.pdf>; Gobierno de España. Carta de Derechos Digitales. Ministerio para la Transformación Digital y de la Función Pública, y Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes, 2021. https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2021/140721-Carta_Derechos_Digitales_RedEs.pdf; Ienca, Marcello, y Roberto Andorno. «Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology». *Life Sciences, Society and Policy* 13, n.o 1 (2017): 5. <https://doi.org/10.1186/s40504-017-0050-1>; Oliveira Wood, Maia de, G. Berger, L. Jarke, et al. *The protection of mental privacy in the area of neuroscience. Societal, legal and ethical challenges*. European Parliament, 2024. <https://doi.org/10.2861/869928>; Szoszkiewicz, Łukasz, y Rafael Yuste. «Mental privacy: navigating risks, rights and regulation». *EMBO Reports* 26, n.o 14 (2025): 3469–73. <https://doi.org/10.1038/s44319-025-00505-6>; UNESCO. *Recommendation on the Ethics of Neurotechnology*. Samarkanda, 2026. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000397812/PDF/397812eng.pdf.multi.page=62>; y Yuste, Rafael. «Advocating for neurodata privacy and neurotechnology regulation». *Nature Protocols* 18, n.o 10 (2023): 2869–75. <https://doi.org/10.1038/s41596-023-00873-0>

Hacia una gobernanza atmosférica preventiva

La emergencia climática y el lento avance en la reducción de emisiones han devuelto al debate internacional la Modificación de la Radiación Solar (SRM), un conjunto de intervenciones que buscan reflejar una parte de la radiación solar para enfriar temporalmente el planeta. La SRM engloba tecnologías diversas, desde la inyección de aerosoles estratosféricos, hasta el blanqueamiento de nubes marinas, la modificación de nubes cirros o sistemas de reflexión en órbita.

Aunque estas propuestas se conocen desde hace décadas, durante mucho tiempo recibieron una atención limitada en la investigación científica. Ninguna se ha desplegado a gran escala y su análisis se apoya casi por completo en modelos climáticos, con incertidumbres relevantes sobre sus efectos regionales y sus impactos ecológicos y sociales. Los modelos sugieren que la SRM podría reducir con rapidez la temperatura media global, en línea con el enfriamiento transitorio observado tras grandes erupciones volcánicas como la del Pinatubo en 1991. Sin embargo, esas mismas intervenciones también podrían alterar de forma desigual los patrones de precipitación y el ciclo hidrológico, con efectos potencialmente persistentes y difíciles de atribuir a escala regional.

Más allá de sus incertidumbres físicas, la SRM introduce, en general, riesgos adicionales de carácter social y político. Desde una perspectiva geopolítica, el coste relativamente bajo de algunas de estas medidas y su impacto potencialmente global hacen plausible, en ausencia de reglas internacionales específicas, la acción unilateral de uno o pocos actores. Ello puede generar tensiones diplomáticas, disputas por la atribución de daños climáticos o respuestas preventivas por parte de otros Estados.

Existen ejemplos de cómo incluso acciones con nulo impacto climático pueden desencadenar reacciones políticas inmediatas. En 2023, una empresa privada con sede en EE. UU. realizó en Baja California (México) un lanzamiento testimonial de dióxido de azufre. Poco después, el gobierno de México anunció una regulación para la prohibición

de estas actividades. En cualquier caso, la ausencia de gobernanza se considera un riesgo en sí misma, ya que pone de relieve una carencia institucional, de participación y de compromiso político para abordar un problema complejo y altamente incierto que requiere combinar innovaciones tecnológicas con cambios sociales profundos.

Hasta ahora, la respuesta institucional dominante no ha sido avanzar hacia la aplicación de la SRM, sino tratar de contenerla mediante principios, orientaciones y mecanismos de control no vinculantes, en gran medida de alcance nacional y con limitada coordinación internacional. Este enfoque convive, sin embargo, con el reconocimiento creciente de que la investigación científica sobre la SRM difícilmente puede ser detenida a escala global, y de que la ausencia de capacidades propias de análisis y evaluación puede debilitar la capacidad de anticipación, respuesta y posicionamiento internacional de los Estados.

A partir de aquí, se abren dos escenarios posibles. En uno, la creciente atención sobre la SRM impulsa una gobernanza atmosférica preventiva, basada en mayor coordinación internacional, transparencia científica, refuerzo de las capacidades públicas de análisis y un consenso explícito en torno al no uso o al uso extremadamente restringido de estas tecnologías. En el otro, la ausencia de reglas claras y la fragmentación geopolítica favorecen dinámicas de free-driving, con actores actuando por su cuenta y el riesgo de escaladas políticas o conflictos por la atribución de daños climáticos.

La tendencia emergente no es, por ahora, el despliegue de la SRM, sino la necesidad de decidir colectivamente qué límites no deben cruzarse. En un mundo marcado por la insuficiencia de la mitigación y la inestabilidad geopolítica, anticipar cómo gobernar, evaluar o, en su caso, limitar estas intervenciones, puede resultar tan relevante para la estabilidad internacional como las propias políticas climáticas.

Para más información, consúltese: Biller-Andorno, Nikola, Maria do Céu Patrão Neves, Migle Laukyte, et al. *Solar radiation modification: ethical perspectives*. Publications office of the European Union, 2024. <https://doi.org/10.2777/951016>; Carabajal, María Inés, María Florencia Santi, Cintia Rodríguez Garat, et al. «No Governance Is Governance: Mapping Solar Geoengineering Discussions in Latin America & the Caribbean». *European Journal of Risk Regulation* 16, n.º 4 (2025): 1326–42. <https://doi.org/10.1017/err.2025.10025>; Group of Chief Scientific Advisors (European Commission). *Solar Radiation Modification*. Publications Office of the European Union, 2024. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/391614>; Holahan, Robert, y Prakash Kashwan. «Disentangling the rhetoric of public goods from their externalities: The case of climate engineering». *Global Transitions* 1 (2019): 132–40. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2019.07.001>; Jinnah, Sikina, y Zachary Dove. «Solar Radiation Management: A History of the Governance and Political Milestones». *Environmental Science: Atmospheres* 5, n.º 6 (2025): 656–73. <https://doi.org/10.1039/D5EA00008D>; MacMartin, D. G., D. Visoni, B. Kravitz, et al. «Scenarios for modeling solar radiation modification». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119, n.º 33 (2022): e2202230119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2202230119>; Parker, Andy, y Peter J. Irvine. «The Risk of Termination Shock From Solar Geoengineering». *Earth's Future* 6, n.º 3 (2018): 456–67. <https://doi.org/10.1002/2017EF000735>; Sovacool, Benjamin K., Chad Baum, y Sean Low. «The next climate war? Statecraft, security, and weaponization in the geopolitics of a low-carbon future». *Energy Strategy Reviews* 45 (2023): 101031. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.101031>; United Nations Environment Programme. *Solar Radiation Modification: No Substitute for Real Climate Action - Issue Note*. Notas Temáticas. United Nations, 2025. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/48995>; y WCRP. «Research to Inform Decisions about Climate Intervention». World Climate research Programme, 2025. <https://www.wcrp-climate.org/ci-overview>



| CAPÍTULO

06

El futuro de
la salud

CRISPR: precisión genética para rediseñar el futuro

Imaginemos una biología cada vez más programable: cultivos que soportan sequías extremas, bacterias que capturan contaminantes y células diseñadas para corregir enfermedades hereditarias. La tecnología CRISPR, desarrollada hace poco más de una década, es una de las herramientas que están haciendo posible este cambio. No es la primera forma de hacer ingeniería genética, pero sí la que ha permitido editar el ADN con una rapidez, precisión y versatilidad que antes eran imposibles.

CRISPR funciona como unas tijeras moleculares guiadas, capaces de localizar un fragmento concreto de ADN y modificarlo como quien corrige una letra en un texto. En muchos casos, estos cambios se realizan sin introducir genes de otras especies, lo que la diferencia de buena parte de los transgénicos clásicos. Las variantes más recientes -como la edición por bases o la edición prime-amplían aún más el abanico de cambios posibles y acercan la idea de "reprogramar" funciones biológicas específicas.

Si estas capacidades siguen madurando, CRISPR podría convertirse en una pieza clave de una bioeconomía donde parte de la producción se base en organismos diseñados para tareas concretas. Esa transición ya empieza a verse en algunos sectores. En agricultura, se desarrollan variedades más resistentes a sequías y olas de calor o con mayor capacidad de fijar carbono en el suelo. En salud, crecen los ensayos clínicos para tratar enfermedades de la sangre, ciertos cánceres y

patologías hereditarias. En biotecnología industrial, aumenta el interés por microorganismos editados que produzcan biopolímeros, enzimas u otros compuestos de forma más eficiente y con menor huella ambiental.

El alcance de esta transformación dependerá de superar varios retos: en salud, lograr que las terapias basadas en CRISPR sean más asequibles y estén mejor evaluadas en términos de eficacia y seguridad; en agricultura, adaptar los marcos regulatorios -donde la normativa europea sigue siendo más restrictiva que la de otros países-; y en la industria biotecnológica, garantizar criterios sólidos de bioseguridad, buena gobernanza y reparto de beneficios que eviten desigualdades y usos de alto riesgo.

España no parte de cero. Aquí se describió la base molecular que dio origen a CRISPR y existen grupos científicos de referencia internacional en los ámbitos agrícola, biomédico y ambiental. Además, nuestro país ha impulsado en la Unión Europea el debate sobre las técnicas genómicas avanzadas y varios hospitales públicos participan en ensayos que podrían acercar estas terapias a la práctica clínica. Una visión más detallada de estos avances y de sus implicaciones normativas se recoge en el informe [La tecnología CRISPR en agricultura, alimentación y salud](#), publicado en 2025 por la Oficina Nacional de Asesoramiento Científico (ONAC), que analiza opciones de políticas públicas para un despliegue seguro, equitativo y socialmente útil de esta tecnología.

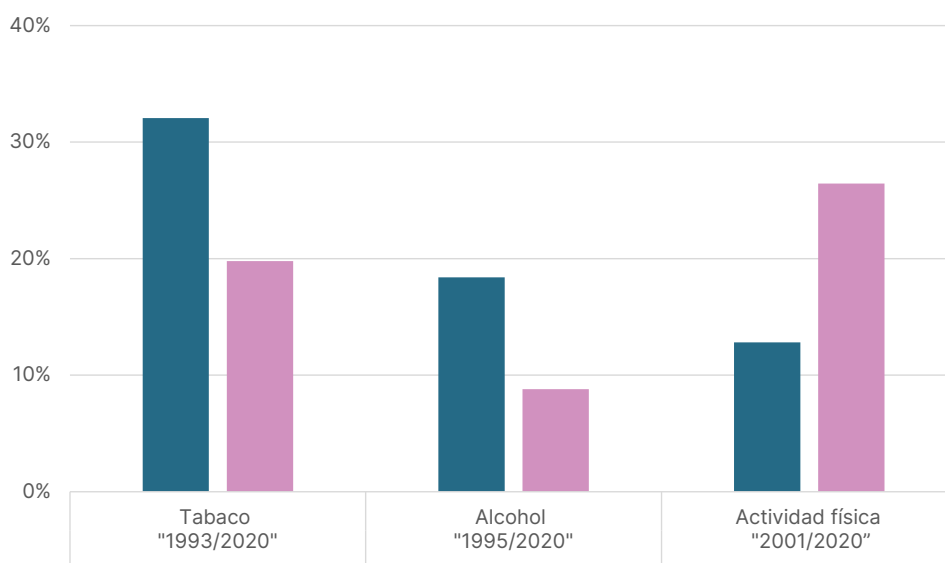
Para más información, véase: Chen, Feng, Lu Chen, Zhao Yan, et al. «Recent Advances of CRISPR-Based Genome Editing for Enhancing Staple Crops». *Frontiers in Plant Science* 15 (2024). <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1478398>; Chodnekar, Swarali Yatin, y Zurab Tsetsckladze. «CRISPR CLIP: comprehensive reviews on interventional studies using precision recombinant technologies: clinical landmarks, implications, and prospects». *Oxford Open Immunology* 5, n.º 1 (2024): iqa013. <https://doi.org/10.1093/oxfimm/iqa013>; Joo, Jeong H., Soogene Lee, y Keun P. Kim. «Precision gene editing: The power of CRISPR-Cas in modern genetics». *Molecular Therapy Nucleic Acids* 36, n.º 4 (2025): 102733. <https://doi.org/10.1016/j.omtn.2025.102733>; Montoliu (coord.), Lluís. *La tecnología CRISPR en agricultura, alimentación y salud*. Informe de Políticas. Grupo de Trabajo para el Asesoramiento Científico al Gobierno, 2025. <https://www.onac.gob.es/novedades/publicaciones/Documents/250822-ONAC%20maquetacion%20informe-PDF%20online.pdf>; Verdezoto-Prado, Jessica, Cristhian Chicaiza-Ortiz, Ana Belén Mejía-Pérez, et al. «Advances in Environmental Biotechnology with CRISPR/Cas9: Bibliometric Review and Cutting-Edge Applications». *Discover Applied Sciences* 7, n.º 3 (2025): 167. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06609-x>; y Yang, Piao, Mohadeseh Khoshandam, Iman Bhia, et al. «Integrating CRISPR/Cas technology with clinical trials: Principles, progress and challenges». *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences* 20, n.º 6 (2025): 101068. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2025.101068>

Menos tabaco y menos alcohol, pero más obesidad: la evolución de los principales factores de riesgo para la salud en España

Cae el consumo de tabaco y alcohol, pero aumenta la obesidad: este contraste define la evolución reciente de los principales factores de riesgo para la salud en España. En 2020, el 20 % de la población española fumaba a diario y solo el 9 % bebía alcohol cada día, frente al 32 % y el 20 % que se registraban en los años noventa [Fig. 13]. Al mismo tiempo, la práctica de actividad física en el tiempo libre ha crecido de forma notable, duplicándose en las últimas décadas del 13 % en 2001 al 26 % en 2020. Si miramos a la población más joven, estas dinámicas se acentúan todavía más. En 2020, poco más del 1 % de los jóvenes de 15 a 24 años consumía alcohol a diario y solo el

15 % fumaba con esa misma frecuencia. Estos niveles tan reducidos apuntan a que los cambios iniciados en generaciones anteriores podrían intensificarse en el futuro, reforzando la caída del consumo de tabaco y alcohol. Sin embargo, no todos los indicadores avanzan en la misma dirección. La obesidad continúa aumentando y afecta ya al 16 % de la población adulta e infantil, una condición que apenas tenía el 7 % de la población a finales de los ochenta. Si la tendencia persiste, uno de cada cuatro niños podría vivir con obesidad en 2050, una señal de alerta que obliga a mirar más allá de los progresos y atender los riesgos emergentes.

Fig. 13. Porcentaje de la población mayor de 15 años que fuma tabaco diariamente, bebe alcohol habitualmente y realiza actividad física durante su tiempo libre



Detrás de este aumento se encuentran cambios profundos en la vida cotidiana. El auge del trabajo en oficina y el incremento del tiempo frente a pantallas han extendido los patrones sedentarios, hasta situar en torno al 40 % la proporción de personas sedentarias en su actividad principal. Al mismo tiempo, y de forma especialmente marcada en los hogares con menos recursos, la combinación entre las limitaciones en el acceso a información nutricional útil, presupuestos ajustados y una oferta alimentaria en la que lo más asequible

suele ser también lo más calórico dificulta adoptar dietas saludables, lo que ha favorecido el avance de la obesidad.

De seguir estas dinámicas en las próximas décadas, el reto será doble. Por un lado, los riesgos asociados al consumo de alcohol y tabaco seguirán disminuyendo en la medida en que se consigan preservar los avances logrados. Por otro lado, la obesidad puede consolidarse como uno de los principales desafíos estructurales de salud

pública. Para evitarlo, serán necesarias políticas que impulsen la movilidad activa y que mejoren la disponibilidad, accesibilidad y atractivo de opciones alimentarias saludables.

España cuenta con un ecosistema institucional capaz de impulsar esta transición: la Estrategia de Promoción de la Salud y Prevención en el Sistema Nacional de Salud y el Plan Estratégico Nacional para la Reducción de la Obesidad Infantil

proporcionan una base sólida sobre la que ampliar y coordinar esfuerzos. Transformar entornos como escuelas, barrios y municipios para hacer más fáciles las opciones saludables y reducir desigualdades puede generar impactos decisivos, desde una menor prevalencia de obesidad y otros factores de riesgo hasta una disminución de la morbilidad y la mortalidad asociadas a enfermedades como el cáncer, las cardiopatías o las afecciones pulmonares crónicas.

Consúltense toda la información en: Alto Comisionado para la Lucha Contra la Pobreza Infantil (coord.). *Plan Estratégico Nacional para la Reducción de la Obesidad Infantil (2022–2030)*. Presidencia del Gobierno de España, 2022. <http://www.comisionadopobrezainfantil.gob.es/es/plan-estrategico-nacional-para-la-reduccion-de-la-obesidad-infantil>; Darmon, Nicole, y Adam Drewnowski. «Contribution of food prices and diet cost to socioeconomic disparities in diet quality and health: a systematic review and analysis». *Nutrition Reviews* 73, n.o 10 (2015): 643–60. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuv027>; Gómez, Santi F., Queralt Farreras, Jan Ródenas, et al. *Estudio Pasos*. Gasol Foundation Europa, 2025. <https://gasolfoundation.org/es/estudio-pasos/>; Hemmingsson, Erik, Paulina Nowicka, Stanley Ulijaszek, y Thorkild I. A. Sørensen. «The Social Origins of Obesity within and across Generations». *Obesity Reviews* 24, n.o 1 (2023): e13514. <https://doi.org/10.1111/obr.13514>; Kerr, Jessica A., George C. Patton, Karly I. Cini, et al. «Global, Regional, and National Prevalence of Child and Adolescent Overweight and Obesity, 1990–2021, with Forecasts to 2050: A Forecasting Study for the Global Burden of Disease Study 2021». *The Lancet* 405, n.o 10481 (2025): 785–812. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(25\)00397-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(25)00397-6); Ministerio de Sanidad. «Consulta Interactiva del SNS». Portal Estadístico. Área de Inteligencia de Gestión. Accedido 15 de diciembre de 2025. <https://pestadistico.inteligenciadegestion.sanidad.gob.es/publicoSNS/N/ense/serie-historica/iii>; Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. *Estrategia de promoción de la salud y prevención en el SNS. En el marco del abordaje de la cronicidad en el SNS*. Informes, Estudios e Investigación. Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad, 2014. <https://www.sanidad.gob.es/areas/promocionPrevencion/estrategiaSNS/docs/EstrategiaPromocionSaludPrevencionSNS.pdf>; Montero-Torreiro, María Fe, Julia Rey-Brandariz, Carla Guerra-Tort, et al. «Evolución de la prevalencia de sedentarismo en la población española entre los años 1987 y 2020». *Medicina Clínica* 162, n.o 6 (2024): 273–79. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2023.10.010>; Peral-Suárez, África, Laura M. Bermejo, María Dolores Salas-González, et al. «Lifestyle Clusters of Diet Quality, Sleep, and Screen Time and Associations with Weight Status in Children from Madrid City: ENPIMAD Study». *Nutrients* 16, n.o 13 (2024). <https://doi.org/10.3390/nu16132096>; Real Decreto 315/2025, de 15 de abril, por el que se establecen normas de desarrollo de la Ley 17/2011, de 5 de julio, de seguridad alimentaria y nutrición, para el fomento de una alimentación saludable y sostenible en centros educativos, Legislation No. Real Decreto 315/2025, BOE-A-2025-7659 53014 (2025). <https://www.boe.es/eli/es/rd/2025/04/15/315>; y Soriano, Joan B., David Rojas-Rueda, Jordi Alonso, et al. «La carga de enfermedad en España: resultados del Estudio de la Carga Global de las Enfermedades 2016». *Medicina Clínica* 151, n.o 5 (2018): 171–90. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2018.05.011>.

Los datos del gráfico en: Ministerio de Sanidad. «Consulta Interactiva del SNS». Portal Estadístico. Área de Inteligencia de Gestión. Accedido 15 de diciembre de 2025. <https://pestadistico.inteligenciadegestion.sanidad.gob.es/publicoSNS/N/ense/serie-historica/iii>; Ministerio de Sanidad. «Portal Plan Nacional sobre Drogas». Plan Nacional sobre Drogas. Accedido 15 de diciembre de 2025. <https://pnsd.sanidad.gob.es/profesionales/sistemasInformacion/sistemaInformacion/domiciliaria/home.htm>; y Soriano, Joan B., David Rojas-Rueda, Jordi Alonso, et al. «La carga de enfermedad en España: resultados del Estudio de la Carga Global de las Enfermedades 2016». *Medicina Clínica* 151, n.o 5 (2018): 171–90. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2018.05.011>.

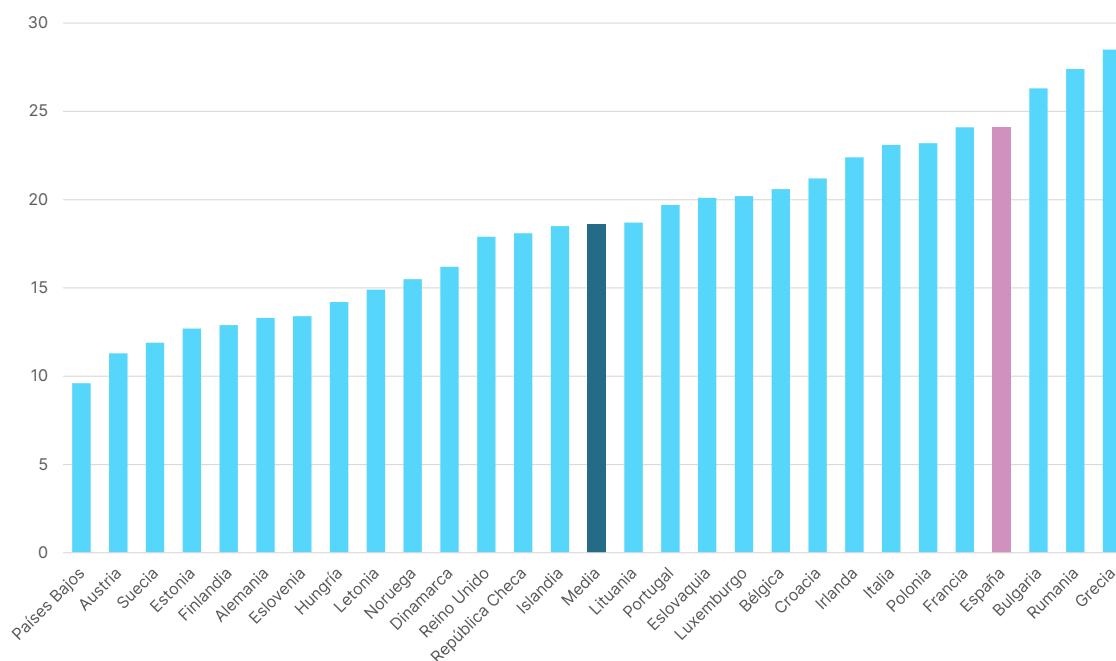
Los datos sobre la prevalencia de obesidad en la población adulta e infantil (población de 6 a 9 años) en: Feijoo, Laura, Julia Rey-Brandariz, Carla Guerra-Tort, et al. «Prevalencia de la obesidad en España y en sus comunidades autónomas, 1987–2020». *Revista Española de Cardiología* 77, n.o 10 (2024): 809–18. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2023.12.019>; Ministerio de Sanidad. «Consulta Interactiva del SNS». Portal Estadístico. Área de Inteligencia de Gestión. Accedido 15 de diciembre de 2025. <https://pestadistico.inteligenciadegestion.sanidad.gob.es/publicoSNS/N/ense/serie-historica/iii>; y Recuerdo Carretero, María Cristina, Carmen Arias López, y Cristina Se´ulveda Villafranca. *Estudio ALADINO 2023. Estudio sobre la Alimentación, Actividad física, Desarrollo Infantil y Obesidad en España 2023*. Ministerio de derechos Sociales, Consumo y Agenda 2030. Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN), 2024. https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/nutricion/ALADINO_AESAN.pdf

Infecciones sin cura: el desafío de la resistencia bacteriana

Las bacterias están desarrollando resistencia a los antibióticos, un fenómeno que comenzó hace décadas y que tiene un impacto considerable: en 2023, esta resistencia estuvo relacionada con 24.000 muertes en España y más de 4,5 millones en el mundo. Las proyecciones en datos internacionales y nacionales recientes apuntan a un escenario aún más preocupante. De mantenerse las tendencias actuales, para 2050 podrían registrarse en nuestro país alrededor de 45.000 fallecimientos al año, cerca del 10 % del total y aproximadamente un tercio de los atribuibles al cáncer. Estas cifras reflejan una realidad alarmante: los antibióticos están perdiendo eficacia y, como consecuencia, infecciones que antes se trataban con facilidad pueden convertirse en problemas de salud graves y difíciles de controlar.

España es uno de los mayores consumidores de antibióticos del continente europeo [Fig. 14]. Su uso comenzó a descender antes de la pandemia, y aunque repuntó en los años posteriores, el nivel registrado en 2023 fue inferior al de 2016, situando a España entre los países que más lo han reducido. Detrás de este consumo elevado están prácticas como el autoconsumo, las prescripciones innecesarias, el abandono prematuro de los tratamientos y el uso extensivo en ganadería. Todo ello evidencia una insuficiente concienciación y sensibilización en la sociedad que acelera la pérdida de eficacia de unos fármacos esenciales para la salud pública.

Fig. 14. Consumo de dosis diarias de antibacterianos de uso sistémico por cada 1.000 habitantes en 2023.



Fuente: elaboración propia a partir de datos de la OCDE

La buena noticia es que aún estamos a tiempo de frenar esta tendencia. Garantizar un acceso adecuado y promover un uso responsable de los antibióticos es fundamental para preservar su eficacia. El Plan Nacional frente a la Resistencia a los Antibióticos (PRAN) 2025-2027 establece un marco estratégico multisectorial para avanzar en la vigilancia, control, prevención, formación e investigación como respuesta integrada a este desafío. Al mismo tiempo, la investigación en

nuevas vacunas, tratamientos y diagnósticos impulsada en los últimos años por la inteligencia artificial (IA) y otras tecnologías abre vías prometedoras, desde programas asistidos por IA que mejoran la detección precoz de resistencia a bacterias hasta decisiones clínicas más precisas, o proyectos que aceleran el descubrimiento de antibióticos más resolutivos. Actuar hoy es la clave para seguir contando con antibióticos efectivos en el futuro.

Para más detalle, véase: Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS) (, Coord.). *Plan Nacional frente a la Resistencia a los Antibióticos 2025-2027*. Ministerio de Sanidad. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Ministerio para la transformación Ecológica y el Reto Demográfico, 2025. <https://resistenciaantibioticos.es/es/publicaciones/plan-nacional-frente-la-resistencia-los-antibioticos-pran-2025-2027>; Chin, Kah Wei, Hui Ling Michelle Tiong, Vijitra Luang-In, y Nyuk Ling Ma. «An overview of antibiotic and antibiotic resistance». *Environmental Advances* 11 (2023): 100331. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100331>; García, Pilar, Daniel López, Álvaro San Millán, Jesús M. Sanz, y Juan A. Hermoso. *Bacterial Resistance to Antibiotics*. Science4Policy. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2024. <https://science4policy.csic.es/en/bacterial-resistance-to-antibiotics/>; International Agency for research on Cancer. «Predictions of the future cancer incidence and mortality burden worldwide up until 2050». *Cancer Tomorrow*, s. f. Accedido 12 de abril de 2026. <https://gco.iarc.who.int/today/>; Naghavi, Mohsen, Stein Emil Vollset, Kevin S. Ikuta, et al. «Global Burden of Bacterial Antimicrobial Resistance 1990-2021: A Systematic Analysis with Forecasts to 2050». *The Lancet* 404, n.º 10459 (2024): 1199-226. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)01867-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)01867-1); Pennisi, Flavia, Antonio Pinto, Giovanni Emanuele Ricciardi, Carlo Signorelli, y Vincenza Gianfredi. «Artificial Intelligence in Antimicrobial Stewardship: A Systematic Review and Meta-Analysis of Predictive Performance and Diagnostic Accuracy». *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases* 44, n.º 3 (2025): 463-513. <https://doi.org/10.1007/s10096-024-05027-y>; Peñalva, Germán, Rafael Cantón, María Teresa Pérez-Rodríguez, et al. «Burden of Bacterial Antimicrobial Resistance among Hospitalised Patients in Spain: Findings from Three Nationwide Prospective Studies». *The Lancet Regional Health - Europe* 51 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.lanepe.2025.101220>; y Ritchie, Hannah, y Edouard Mathieu. «How Many People Die and How Many Are Born Each Year?». *Our World in Data*, 2023. <https://ourworldindata.org/births-and-deaths>

