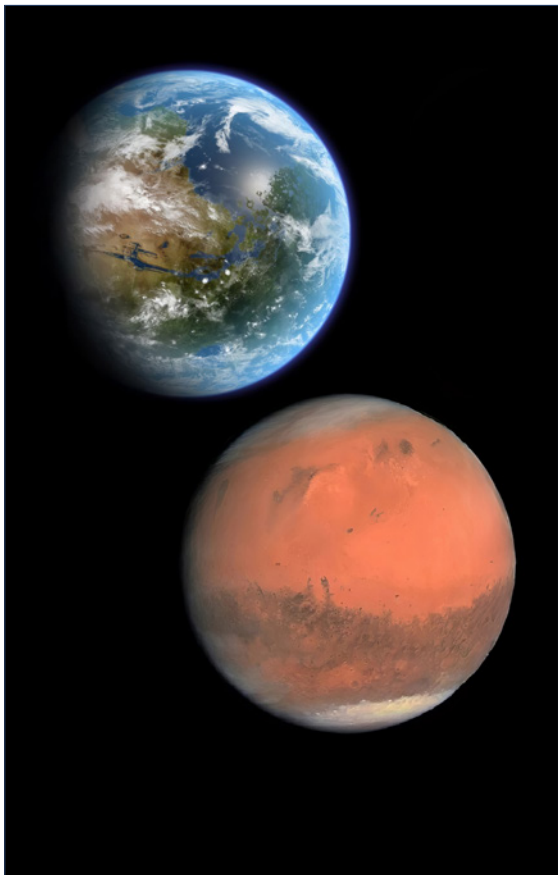
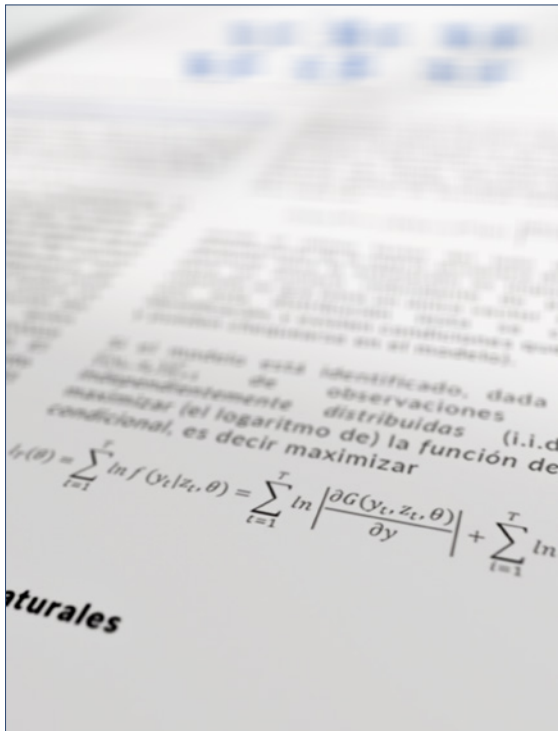


REAL ACADEMIA  
DE **CIENCIAS EXACTAS,**  
**FÍSICAS Y NATURALES**  
DE ESPAÑA

**R E V I S T A**  
**C I E N T Í F I C A**



REAL ACADEMIA  
DE **CIENCIAS EXACTAS,  
FÍSICAS Y NATURALES**  
DE ESPAÑA

— **R E V I S T A**  
**C I E N T Í F I C A**

Esta Revista de la Real Academia de Ciencias Serie General (RACSG) se publica al amparo de las disposiciones recogidas en el Artículo 5i de sus Estatutos y el Artículo 41 del Reglamento que los desarrolla.

La Academia no se hace solidaria de las opiniones científicas expuestas por los autores de los artículos publicados en su revista.

ISSN e: 2659-4242.

Editores: Jesús Ildefonso Díaz, Manuel Elices y José Luis Sanz.

Comité Editorial: Jesús Ildefonso Díaz, Ana M. Crespo, Miguel Delibes, Manuel Elices, Javier Jiménez Sendín, Juan M. Rojo, Arturo Romero y José Luis Sanz.

Puede consultar las normas en el enlace: <https://rac.es/aviso-legal/>

© 2025 Real Academia de Ciencias

DISEÑO, MAQUETACIÓN Y PRODUCCIÓN GRÁFICA



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

- 5 El Atlas de la desertificación de España, un primer paso para atajar la degradación de la tierra**  
Atlas of desertification in Spain: A first step to tackle land degradation  
*Jaime Martínez-Valderrama; Emilio Guirado; Jorge Olcina; Elsa Varela; Julia Martínez-Fernández; Manuel Esteban Lucas-Borja; Javier Martí-Talavera; Fernando T. Maestre*
- 22 Sobre economía y las ciencias matemáticas, físicas y naturales**  
On economics and mathematical, physical and natural sciences  
*Jose M. Vidal-Sanz*
- 40 Una perspectiva temporal del cambio climático**  
A time perspective of climate change  
*Laia Alegret Badiola*
- 54 Navigating the ethical and societal challenges of Artificial Intelligence: ensuring responsible innovation**  
Abordando los retos éticos y sociales de la Inteligencia Artificial: Hacia una innovación responsable  
*Amparo Alonso Betanzos*
- 66 Marte: objetivo geológico y astrobiológico y primer destino planetario de la humanidad**  
Mars: geological and astrobiological target and first planetary destination of humankind  
*Jesús Martínez Frías*
- 78 Ingeniería de proteínas: innovaciones para biomedicina, biotecnología y bioelectrónica**  
Protein engineering: innovations for biomedicine, biotechnology, and bioelectronics  
*Laura Perez-Chirinos; Gabriela Guedes; Laura Saa; Aitziber L. Cortajarena*
- 96 Desde Volta al litio y más allá: una visión personal acerca del desarrollo de las tecnologías de baterías**  
From Volta to lithium and beyond: a personal view on battery technology development  
*M. Rosa Palacín*
- 108 Invasiones biológicas por especies exóticas**  
Biological invasions by non-native species  
*Montserrat Vilà; Belinda Gallardo; Pablo González-Moreno*

REAL ACADEMIA  
DE **CIENCIAS EXACTAS,**  
**FÍSICAS Y NATURALES**  
DE ESPAÑA

— **R E V I S T A**  
**C I E N T Í F I C A**

## ORIGINAL

# EL ATLAS DE LA DESERTIFICACIÓN DE ESPAÑA, UN PRIMER PASO PARA ATAJAR LA DEGRADACIÓN DE LA TIERRA

## ATLAS OF DESERTIFICATION IN SPAIN: A FIRST STEP TO TACKLE LAND DEGRADATION.

**Jaime Martínez-Valderrama<sup>1,2</sup>; Emilio Guirado<sup>2,3</sup>; Jorge Olcina<sup>4</sup>; Elsa Varela<sup>5</sup>; Julia Martínez-Fernández<sup>6</sup>; Manuel Esteban Lucas-Borja<sup>7</sup>; Javier Martí-Talavera<sup>8</sup>; Juanma Cintas<sup>1</sup>; Fernando T. Maestre<sup>3,9</sup>**

1. Estación Experimental de Zonas Áridas. CSIC.
2. Instituto Multidisciplinar para el Estudio del Medio «Ramón Margalef». Universidad de Alicante.
3. King Abdullah University of Science and Technology (KAUST).
4. Departamento de Análisis Regional y Geografía Física. Universidad de Alicante.
5. Instituto de Políticas y Bienes Públicos, Centro de Ciencias Humanas y Sociales, CSIC.
6. Fundación Nueva Cultura del Agua.
7. E.T.S. de Ingeniería Agraria, de Montes y Biotechnología. Universidad de Castilla-La Mancha.
8. Instituto Interuniversitario de Geografía, Laboratorio de Climatología, Universidad de Alicante.
9. Miembro de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España.

## RESUMEN

La desertificación es uno de los principales problemas medioambientales de España. Su gravedad y extensión no dejan de aumentar – del mismo modo que se expanden las zonas áridas– debido al proceso actual de cambio climático, a un uso insostenible de los recursos naturales y a la falta de actuaciones efectivas para atajar sus causas. La ambigüedad del concepto de desertificación ha desembocado en la desaparición de los mapas de desertificación del último Atlas Mundial de Desertificación. Sin embargo, es imprescindible conocer qué lugares están desertificados, cuáles se están desertificando y cuáles pueden desertificarse en el futuro. La Neutralidad en la Degradación de las Tierras (NDT), auspiciada por la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD), es la principal herramienta a nivel institucional para abordar este fenómeno, y en ella se priorizan las actuaciones de prevención. Nuestro objetivo es contribuir al desarrollo metodológico de la cartografía de la desertificación, un reto científico plenamente vigente y expresamente solicitado en la Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación de España. Para ello proponemos la elaboración de un Atlas de la Desertificación de España (ADE) a partir de la información biofísica y socioeconómica disponible. Combinando esta información con proyecciones climáticas, «big data» e inteligencia artificial será posible elaborar un mapa de la probabilidad de desertificación. En este artículo se exponen las razones por las cuales los métodos propuestos hasta ahora para abordar la desertificación han fracasado, así como los fundamentos metodológicos de la innovadora metodología que proponemos.

**Palabras clave:** Zonas áridas; Socioecosistemas; Degradación de la tierra; Mapas; Inteligencia artificial.

## ABSTRACT

Desertification is one of Spain's most pressing environmental challenges. Its severity and extent continue to grow—just as arid zones expand—driven by climate change, unsustainable use of natural resources, and a lack of effective action to address its root causes. The ambiguity surrounding the concept of desertification has even led to the removal of desertification maps from the latest World Atlas of Desertification. However, it remains essential to identify which areas are already desertified, which are currently undergoing desertification, and which may be at risk in the future. The concept of Land Degradation Neutrality (LDN),



promoted by the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), is the main institutional framework for addressing this phenomenon, prioritizing preventive action.

Our goal is to contribute to the scientific advancement of desertification mapping, a pressing challenge explicitly identified in Spain's National Strategy to Combat Desertification. To this end, we propose the development of a Spanish Desertification Atlas (ADE) based on available biophysical and socio-economic data. By combining this information with climate projections, big data, and artificial intelligence, we aim to create a probability map of desertification.

In this article, we explain why previous approaches to desertification have fallen short and outline the methodological foundations of the innovative strategy we propose.

**Keywords: Drylands; Socio-ecosystems; Land degradation; Mapping; Artificial Intelligence.**

Correspondencia

Jaime Martínez Valderrama.

Estación Experimental de Zonas Áridas (EEZA)

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Ctra. de Sacramento S/N, La Cañada de San Urbano, 04120, Almería (España)

E-mail: jaimonides@eeza.csic.es

### LA COMPLEJIDAD DE LA DESERTIFICACIÓN Y LA IMPORTANCIA DE LAS ZONAS ÁRIDAS

La desertificación se define por la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (CNULD) como la «degradación de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedo-secas como consecuencia de variaciones climáticas y actividades humanas», entendiendo por degradación «la pérdida de productividad biológica, económica y de biodiversidad» (UNCCD, 1994). Llegar a la actual definición de la CNULD supuso un continuo esfuerzo de conceptualización y discusión que dejó un reguero nada despreciable de más de cien definiciones por el camino (Reynolds y Stafford Smith, 2002). Ello evidencia que ninguna de ellas aprehende todos los matices de un problema complejo y que la discusión sigue abierta. Buena parte de ello se debe a las distintas percepciones del término «degradación», cuyo significado depende de los valores e idiosincrasia de cada sociedad (Meyfroidt, Ryan, et al., 2022). Así, por ejemplo, los pastizales en los que medran los matorrales (por sobrepastoreo o abandono) son tildados de «desiertos verdes» (Perevolotsky & Seligman, 1998) desde el punto de vista de una percepción ganadera (y ciertamente es una pérdida de productividad económica), pero con una visión más ecológica se percibe como una mejora de la condición de la tierra, al aumentar su biomasa y cubierta vegetal, cuestión ratificada por los principales indicadores que se utilizan para evaluar la desertificación (Cowie et al., 2018).

Lastrada por sus orígenes coloniales (Davis, 2016; Reynolds, 2021) y asentada en el imaginario popular –y aún en diversos círculos académicos– la desertificación suele equipararse al avance del desierto (Martínez-Valderrama et al., 2020b), a las sequías (CRSTRA & BeSafeNet, 2023) o a la erosión (Puigdefábregas, 1995). Ello ha conducido al fracaso a muchas de las soluciones que se han ido proponiendo para abordar este grave problema (Prince & Podwojewski, 2019), desde la construcción de «murallas verdes», diseñadas para contener el avance de las dunas y que suelen secarse y restringir aún más el exiguo balance hídrico de esas zonas (Turner et al., 2023), hasta la implantación de regadíos en tierras marginales y naturalmente dispuestas para el pastoreo (Martínez Fernández et al., 2002) a modo de barreras contra la desertificación (Fundación Nueva Cultura del Agua, 2020), que han generado una riqueza efímera a sus habitantes a costa de agotar acuíferos esenciales para la región (Martínez-Valderrama et al., 2023). Sin embargo, como evidencia el sobrepastoreo de las estepas de esparto en el norte de África que ha dado lugar a campos de dunas donde antes había una tupida cubierta vegetal (Hirche et al., 2011; Martínez-Valderrama et al., 2018), el problema no es parar el avance del desierto, sino establecer políticas de uso del suelo que no den lugar a paisajes que se parecen a los desiertos debido a que se esquilda su productividad natural.

El contexto climático en el que se puede desarrollar la desertificación nos da una idea de la magnitud



del problema. Genéricamente, se refiere a las zonas áridas<sup>1</sup>, aunque la definición de la CNULD excluye las hiperáridas por considerarlas naturalmente improductivas, lo que es una de esas cuestiones aún abiertas y en debate (Martínez-Valderrama et al., 2020a). La condición de «zona árida» viene determinada por el valor del índice de aridez (IA) – cuya solvencia para determinar lo que es o no árido en el actual contexto del cambio climático también está en duda (Greve et al., 2019; Wang et al., 2022) –, que es la ratio entre la precipitación media anual y la evapotranspiración potencial, es decir, da una medida del agua que se puede evaporar en un territorio respecto a la que recibe. La definición de la CNULD se refiere a aquellas zonas áridas en las que el IA está comprendido entre 0,05 y 0,65. En conjunto, ocupan en 45% de la superficie terrestre y son el mayor bioma por su extensión. No es de extrañar, por tanto, que den cobijo a uno de cada tres habitantes de la Tierra (UNCCD, 2022), al 65% de los pastizales y al 35% de las tierras de cultivo (Cherlet et al., 2018). Además de su enorme importancia socioeconómica, desde el punto de vista ecológico resultan fundamentales (Maestre et al., 2021) ya que, por ejemplo, albergan el 36% del carbono orgánico del suelo y sus bosques ocupan 1.283 millones de hectáreas (Guirado et al., 2022). Los ecosistemas áridos son también muy diversos – albergan por ejemplo alrededor del 20 % de los principales centros de diversidad vegetal del mundo e incluyen verdaderos «puntos calientes» de biodiversidad vegetal como el *fynbos* sudafricano (Maestre et al., 2021) –, y constituyen un fascinante laboratorio natural para estudiar la evolución y la adaptación de las especies a condiciones extremas, además de ofrecer servicios ecosistémicos esenciales para el mantenimiento de más de 1000 millones de personas (Middleton et al., 2011). Además de su elevada diversidad vegetal, que en algunos casos es superior a la encontrada en biomas más productivos, los ecosistemas áridos también albergan comunidades microbianas y edáficas muy diversas. Esta biodiversidad es crucial para mantener el funcionamiento de los ecosistemas áridos (Martínez-Valderrama et al., 2022) y del planeta en su conjunto.

<sup>1</sup> ***En rigor, hay cuatro categorías de aridez (subhúmedo seco, semiárida, árida e hiperárida), pero en castellano solemos hablar de zonas áridas para referirnos a todas ellas, ya que la traducción literal de drylands (tierras secas) puede resultar confusa.***

## LOS MAPAS DE DESERTIFICACIÓN

La importancia de las zonas áridas y la magnitud de la desertificación aumentan a medida que se consolidan los efectos del cambio climático – que expanden las zonas áridas (Wu et al., 2023), y y aumentan la demanda de recursos hídricos (Kuang et al., 2024; Mehta et al., 2024)– que, junto con la presión demográfica y los cambios en el estilo de vida, imponen una demanda insaciable de recursos. Sin embargo, la CNULD ha perdido su influencia debido a la ambigüedad que siempre ha rodeado al concepto de desertificación (Martínez-Valderrama, 2024; Reynolds, 2021) y a un asesoramiento científico intermitente (Bauer & Stringer, 2009), aunque este último parece haber cobrado relevancia a partir de la creación de la interfaz ciencia-política en 2013 (Castillo Sánchez, 2022; Chasek et al., 2019). Uno de los hechos más notables en esta errática evolución es la ausencia de mapas de desertificación en el último Atlas Mundial de Desertificación (AMD) (Cherlet et al., 2018).

Los procesos de transformación del espacio geográfico necesitan ser despiezados para su mejor percepción, lectura y asimilación en el proceso de investigación científica. Esta disección, aunque artificiosa, se hace necesaria para comprender la complejidad de un medio natural. La elaboración de cartografía permite sintetizar dicha complejidad (Sancho Comíns & Olcina Cantos, 2020). La sencillez que debe caracterizar a un mapa temático hace posible la aprehensión de los elementos que forman un proceso de desertificación y permite integrarlos en un conjunto de escala superior (región natural) que les otorga sentido.

Los esfuerzos por plasmar cartográficamente dónde tiene lugar la desertificación y cuál es su severidad han sido un reto continuo desde que en 1977 se presentase el primer mapa a escala global. Desde entonces, se han elaborado seis mapas globales sobre desertificación (dos de ellos denominados Atlas), y otros cuatro sobre degradación, esto es, mapas que consideran tanto las tierras secas como las húmedas (Tabla 1). Como podemos ver, los mapas más recientes no son los de desertificación, lo que refleja una tendencia hacia la consideración de la degradación en cualquier ámbito climático. Este es un aspecto importante, ya que atenúa el papel de la aridez en la degradación. Sin embargo, la desertificación, que como hemos visto se refi-

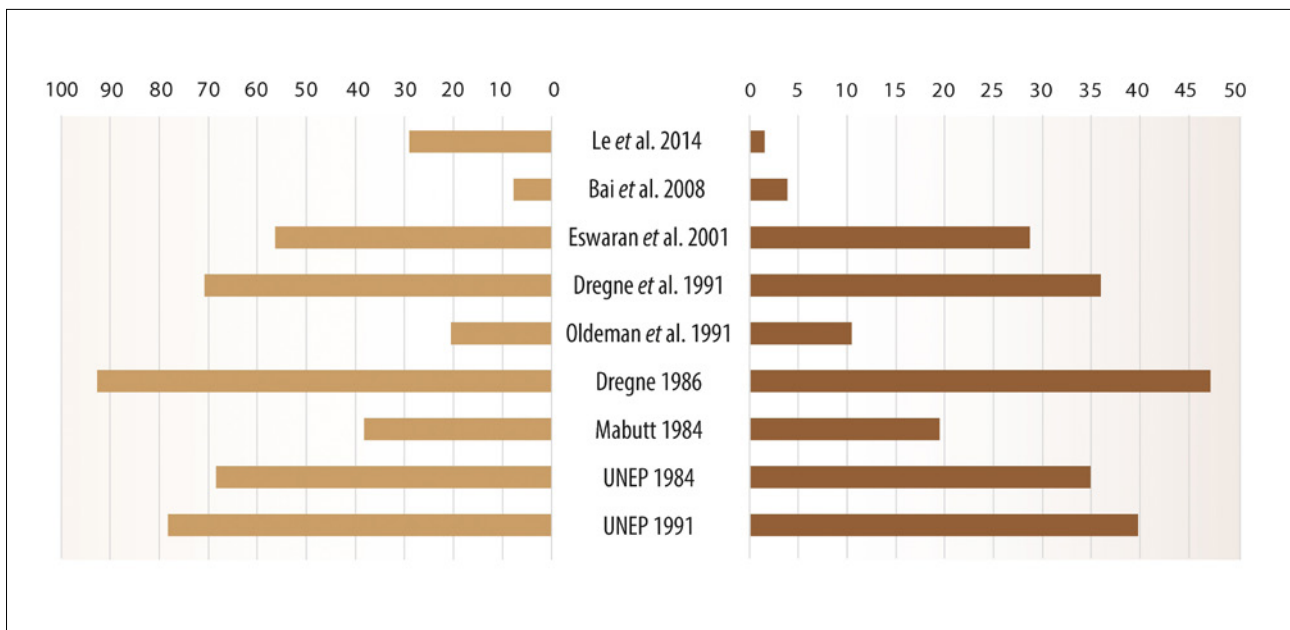
| Año                           | Denominación original                                          | Instituciones involucradas                                        | Referencia                             |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Mapas de desertificación      |                                                                |                                                                   |                                        |
| 1977                          | Generalized Map of the Status of Desertification in Arid Lands | United Nations Environmental Program (UNEP)                       | (Dregne, 1977)                         |
| 1983                          | Desertification of Arid Lands                                  | Texas Tech University                                             | (Dregne, 1983)                         |
| 1992                          | Global Desertification Dimensions and Costs                    | Texas Tech University                                             | (Dregne & Chou, 1992)                  |
| 1992                          | World Atlas of Desertification (1 <sup>st</sup> Edition) *     | International Soil Reference and Information Center (ISRIC), UNEP | (UNEP, 1992)                           |
| 1997                          | World Atlas of Desertification (2 <sup>nd</sup> Edition)       | UNEP                                                              | (UNEP, 1997)                           |
| 2005                          | Synthesis on the Main Areas of Land-Cover and Land-Use Change  | Millenium Assessment (MA)                                         | (Lepers et al., 2005)                  |
| Mapas globales de degradación |                                                                |                                                                   |                                        |
| 1991                          | Global Assessment of Human-induced land Degradation (GLASOD)   | ISRIC, UNEP                                                       | (Oldeman, Hakkeling, y Sombroek, 1991) |
| 2001                          | Major Land Resource Stresses and Conditions                    | United States Natural Resource Conservation                       | (Beinroth et al., 2001)                |
| 2008                          | Global Assessment of Land Degradation and Improvement (GLADA)  | ISRIC, Food and Agriculture Organization (FAO)                    | (Bai et al., 2008)                     |
| 2011                          | Global Land Degradation Information Systems (GLADIS)           | FAO                                                               | (Nachtergaele et al., 2011)            |

**Tabla 1. Mapas globales de desertificación o degradación a partir de Safriel (2007) y Prince (2016). Nótese que no aparece el Atlas Mundial de Desertificación de 2018 al carecer de mapas de desertificación. \*Los Atlas de desertificación de 1992 y 1997 son un subconjunto del mapa de degradación GLASOD, en el que únicamente se consideran las zonas áridas.**

ere exclusivamente a las zonas áridas, se diferencia de otros procesos de degradación porque puede llegar a ser irreversible a escala humana, dada la lentitud de los procesos biofísicos en estas zonas. Así, por ejemplo, la recuperación del suelo fértil perdido por erosión, o la recarga de los acuíferos sobreexplotados tienden a reducirse a medida que aumenta la aridez (MEA, 2005).

La fiabilidad de los mapas de desertificación nunca fue muy alta. Los propios autores han cuestiona-

do su validez. Por ejemplo, Dregne y Chou (1992), refiriéndose al Atlas de 1992, afirmaron que: «La base de información sobre la que se hicieron las estimaciones es deficiente: los relatos anecdóticos, los informes de investigación, las descripciones de viajeros, las opiniones personales y la experiencia local proporcionaron la mayor parte de las evidencias utilizadas.» Al contrastarlos con otros datos suelen ofrecer resultados desconcertantes. En el caso de Argelia se estimó, en ese mismo mapa de Dregne y Chou, que el 93% de sus tierras de cultivo



**Figura 1. Evaluaciones del alcance de la desertificación en las zonas áridas del planeta. A) Superficie en millones de km²; B) Porcentaje de superficie de zonas áridas desertificada. Adaptado de Sterk y Stoorvogel (2020).**

estaban desertificadas, mientras que la FAO mostraba datos de incremento de los rendimientos agrícolas de 400 – 600 kg ha<sup>-1</sup> (MEA, 2005).

Como se puede ver en la Figura 1, el área que se estima desertificada fluctúa, según el trabajo consultado, entre los 1,47 y los 47,1 millones de km². Igualmente, se han dado cifras muy variables de la población que sufre las consecuencias de la desertificación, que van desde los 2.700 millones de personas (IPBES, 2018) a los 500 (IPCC, 2019), pasando por los 1.300 millones que dice la CNUCLD (UNCCD, 2017). La crítica no solo se restringe a la falta de consenso entre las distintas aproximaciones, sino también a su incapacidad para ser aplicados, especialmente a escala regional y local, para prevenir y controlar la degradación del suelo (Verón et al., 2006).

#### RAZONES DE SU INSOLVENCIA Y ALTERNATIVAS

A pesar de la ausencia de mapas de desertificación, el AMD presenta mapas sobre una gran cantidad de variables relacionadas con la desertificación. Esta es, precisamente, una de las principales razones que explican el fracaso de este tipo de mapas. La degradación incluye demasiados procesos, y no todos de

índole biofísica, como bien señala la definición de desertificación. El problema recurrente con el que se topa la cartografía de la desertificación es la falta de reconocimiento de que la desertificación no es un único fenómeno (Gibbs y Salmon, 2015), y que por tanto no se concreta en una única variable que se pueda medir. Es aquí donde la CNUCLD muestra sus fisuras respecto a sus convenciones hermanas, la de Cambio Climático y la de Biodiversidad. En la primera, el problema se puede monitorizar mediante un indicador muy simple, las partes por millón de CO<sub>2</sub> en la atmósfera. Además, las diferencias regionales son innecesarias, puesto que el cambio climático se refiere a la condición media de la atmósfera. En la segunda, pueden manejarse diversos indicadores, que pueden tener más o menos sentido según el lugar al que se refiera. Pero todos apuntan a la misma dirección, que es medir la biodiversidad y el grado de conservación de hábitats.

Concentrar los diversos procesos de desertificación en un solo indicador ha sido, hasta el momento, un obstáculo insalvable, que se ha tratado de superar mediante diversas aproximaciones. Todas ellas tratan de agregar una colección de variables muy diversas entre sí. Por ejemplo, el mapa de riesgo de desertificación de España (Figura 2), que presentó el Programa de Acción Nacional contra la Desertificación (PAND) de 2008 (MAGRAMA, 2008), aplica

la metodología MEDALUS (EC-European Commission, 1999). En concreto, este mapa es una simple operación de álgebra para sumar el efecto de cuatro factores (aridez, erosión, uso de acuíferos y superficie quemada por incendios forestales), excluyendo la posibilidad de una sinergia entre ellos (Martínez-Valderrama et al., 2021). Por ejemplo, en un territorio con mayor aridez, y por tanto con menores tasas de productividad, la pérdida de suelo tiene un mayor impacto que en zonas menos áridas, puesto que las tasas de formación de suelo son menores. Este tipo de interacciones no son consideradas con la metodología utilizada en el PAND, que también ignora las causas del problema. Así, el mapa de riesgos del PAND no incluye ninguna variable que represente la evolución de la superficie de regadío, que causa el deterioro de las masas de agua subterránea (De Stefano y Lopez-Gunn, 2012), ni se considera ningún otro uso del suelo o variable que pueda explicar los motivos de la desertificación (Cherlet et al., 2018). Las cuatro variables utilizadas se baremaron según

criterios subjetivos. Por ejemplo, cuando la erosión del suelo estimada por el modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) está comprendida entre 12 y 25 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, el peso del factor erosión es 2. Si en ese píxel, además, hay una masa de agua subterránea sobreexplotada, se añade un punto, y si el porcentaje de superficie acumulada recorrida por el fuego durante 10 años (variable un tanto intrincada) supera el 10%, tenemos otro punto. Por último, el grado de aridez añade un punto si es semiárido y dos si es árido (el sub-húmedo seco no penaliza). Como se puede deducir, a más puntos, más riesgo de desertificación. El mayor mérito de este tipo de aproximaciones es que consiguen dar una cifra para cada píxel del territorio. Sin embargo, este tipo de mapas han de tomarse como los primeros intentos para abordar y acotar el problema, pero requieren profundas reformas conceptuales para dar una idea precisa del problema. Las nuevas herramientas metodológicas y el enorme caudal de datos disponibles pueden aportar luz al problema de cartografiar de la desertificación.

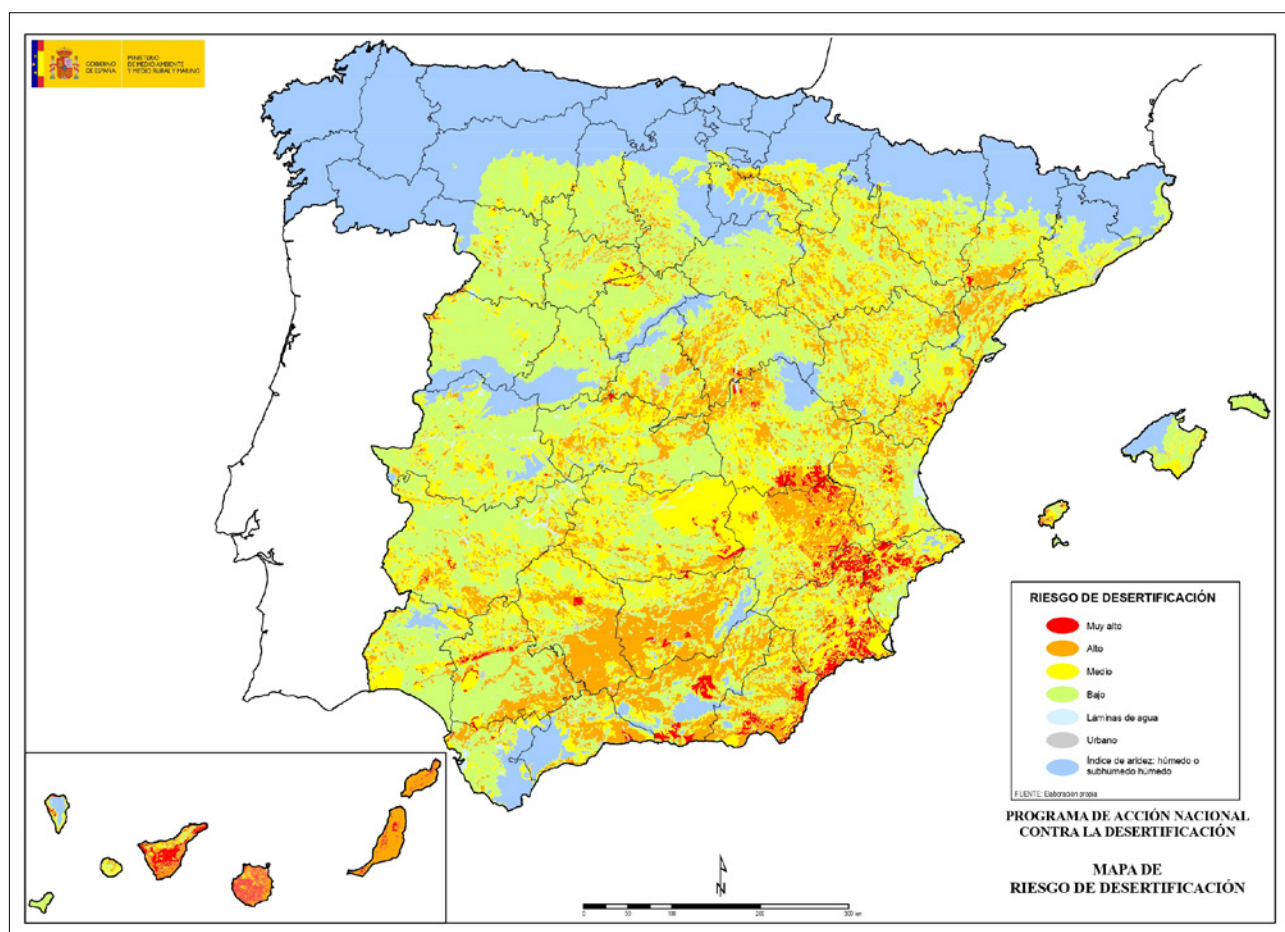


Figura 2. Mapa de riesgo de desertificación de España (MAGRAMA, 2008).



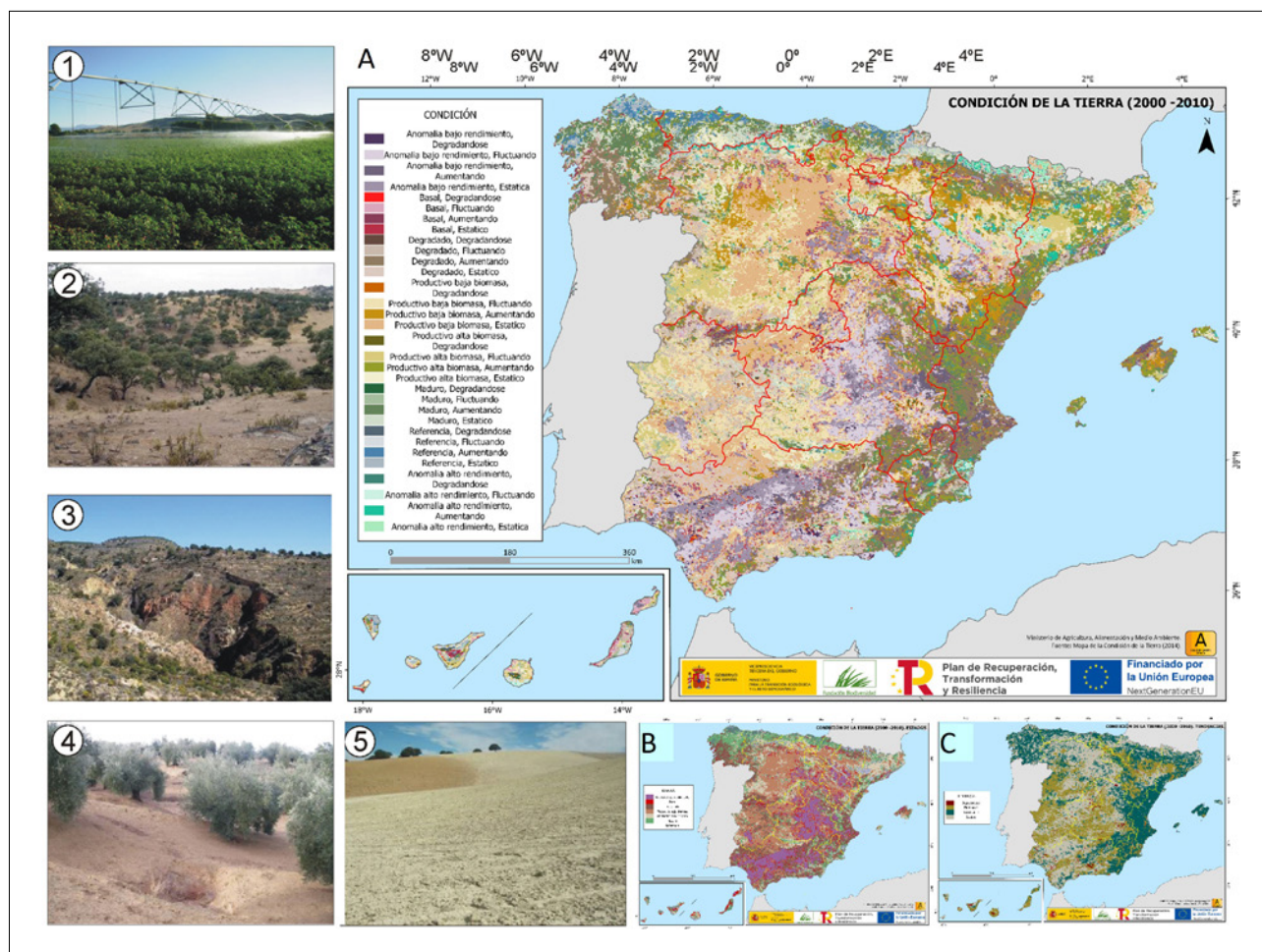
Además de la dificultad para medir la desertificación, ya se han apuntado otros puntos débiles de la cartografía disponible. Estos atlas se basan en su mayoría en evaluaciones subjetivas de expertos, por lo que serían difíciles de aplicar en otros lugares o por diferentes observadores, y considerarse como condición basal para evaluar cambios futuros (Prince, 2016). Asimismo, muchas de las magnitudes que se miden a escala local resultan muy difíciles de estimar a mayor escala. En muchos lugares faltan datos de campo, con lo que esos «huecos» deben rellenarse con estimaciones. La erosión del suelo, que es una de las principales variables consideradas en la caracterización de la desertificación, ilustra este problema. Así, las mediciones en parcelas resultan costosas y es imposible contar con este tipo de datos en grandes territorios. En su defecto se emplean modelos matemáticos (como el mencionado RUSLE, que fue concebido a escala de parcela y por tanto no puede aplicarse a escala de paisaje) que se enfrentan a una de las principales características de la erosión, como es su impredecibilidad. En efecto, en la erosión es clave la coincidencia de suelo desnudo (como consecuencia de un incendio forestal o de las labores agrícolas) y lluvias torrenciales. Un modelo suele sobreestimar la tasa de erosión si no se da esta coincidencia, o subestimarla, si se da, puesto que utiliza valores medios. Aunque los modelos de erosión se han ido perfeccionando, su estima depende completamente de una acertada predicción climática, que localice temporal y espacialmente los eventos de precipitación torrenciales.

Finalmente, otra de las grandes dificultades, tanto conceptuales como metodológicas, es determinar cuantitativamente el umbral que separa el estado no-degradado, del degradado. Para determinar que un lugar se ha desertificado necesitamos tener una referencia de cómo es (o era) el lugar sin degradar, y así estimar cuanto se aleja de ese umbral la variable, o variables, que hayamos elegido para evaluar la desertificación. Esta es otra cuestión espinosa que requiere, como decíamos, consensuar cuál es el estado no degradado. Podemos pensar que el ideal es un ecosistema prístino, y comparar el estado actual con esa referencia un tanto utópica. En ese caso, y si estamos en el ámbito mediterráneo, donde los ecosistemas han sufrido transformaciones y adaptaciones desde hace miles de años, prácticamente todo el territorio puede considerarse degradado; no queda nada del Edén original. A modo de ejemplo, en el Oranesado argelino existían amplias extensiones de esparto que se consideraban

un ejemplo de buena conservación, hasta que el sobrepastoreo propiciado por el incremento de la cabaña ganadera y la desaparición del pastoreo nómada lo degradaron (Martínez-Valderrama et al., 2018). Sin embargo, esta era, a su vez, la versión degradada del pinar que había en la región antes de que los romanos lo talaran.

Como consecuencia de las dificultades metodológicas y los pobres resultados alcanzados, el AMD presenta una alternativa a los mapas de desertificación, la denominada «Convergencia de Evidencias». Consiste en identificar aquellos lugares más proclives a la degradación al coincidir en ellos una serie de factores (biofísicos, climáticos y socioeconómicos) que amenazan el equilibrio entre el uso de recursos y su regeneración. El enfoque de la convergencia es muy acertado, aunque no novedoso. En efecto, encontramos antecedentes metodológicos de esta propuesta en nuestro PAND (Martínez-Valderrama et al., 2022). Los paisajes de desertificación propuestos por el PAND tienen su origen en el proyecto de investigación SURMODES (Puigdefábregas & del Barrio, 2000), que detectó a nivel provincial, a partir de información climática y económica, los «puntos calientes» de la desertificación en España. Tras la publicación del PAND, se han hecho dos esfuerzos metodológicos en nuestro país para tratar de acotar el problema de la desertificación (Figura 3).

Por un lado, se ha construido un mapa sobre la condición de la tierra y su tendencia (del Barrio et al., 2010; Sanjuán et al., 2014) a partir del concepto de Uso Eficiente de la Lluvia (Le Houerou, 1984), que compara la productividad primaria de un lugar considerando la productividad esperada de acuerdo con la lluvia que recibe. Aunque este mapa no incluye muchas de las variables relacionadas con la desertificación, la productividad primaria neta, que suele aproximarse con el Índice utilizando como variable proxy el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Tucker et al., 1986; NDVI en inglés), forma parte de la triada de indicadores de la Neutralidad de la Degradación de las Tierras (NDT) (Cowie et al., 2018), el reciente paradigma para abordar la desertificación propuesto por la CNULD. De este mapa –elaborado para el período 2000-2010– se obtuvo la cifra que actualmente se maneja en España sobre el alcance del problema. Se estimó que el 73,8% del territorio es susceptible de desertificación (es decir, son zonas áridas), que el 20% del territorio está degradado, y que el 1% se está degradando activamente (Martínez-Valderrama et al., 2016; Sanjuán et al., 2014). La



**Figura 3. Mapa de condición de la tierra de España (Sanjuán et al., 2014) y paisajes de desertificación del PAND (MAGRAMA, 2008): (1) Sistemas agronómicos de regadío sometidos a procesos de desertificación; (2) Sistemas agro-silvo-pastorales afectados por sobrepastoreo; (3) Matorrales degradados y eriales; (4) Cultivos leñosos afectados por la erosión; (5) Cultivos extensivos de secano con riesgo de erosión. Fuente: Martínez-Valderrama et al. (2016)**

segunda iniciativa fue establecer modelos dinámicos para cada uno de los paisajes considerados, con el fin de estimar la probabilidad de desertificación (Ibáñez et al., 2008) dadas las condiciones climáticas y de uso del suelo vigentes. A pesar de estos avances, tanto en la caracterización de la degradación actual como en el riesgo de que ocurra, existe un vacío conceptual, metodológico y de gestión que es preciso abordar. El problema no será la ausencia de mapas, sino que ante la necesidad de precisar dónde ocurre el problema y monitorizar su avance, la Administración utilice mapas desactualizados, con poca validez científica o que incluso tergiversen una vez más el problema (por ejemplo, el mapa de aridez se ha utilizado como equivalente del de desertificación, y los niveles de aridez como sinónimos de la intensidad de degradación).

### UNA OPORTUNIDAD CIENTÍFICA Y UNA NECESIDAD POLÍTICA.

Tras más de cuatro décadas intentando cartografiar la desertificación, el veredicto del AMD ha dejado en blanco estos mapas. Uno de los principales problemas de esta situación es que se pueden rellenar con información indirectamente relacionada con el problema y que en lugar de contribuir a resolverlo añadan más confusión. Así, cuando las administraciones se ven exigidas a dar una respuesta al problema de la desertificación, lo más intuitivo es que utilicen, si no hay otra cosa, el mapa de aridez, lo cual es conceptualmente un error de bulto, puesto que las zonas áridas son solo las zonas potencialmente desertifica-



bles. Por otra parte, un mapa en blanco es un reto para un investigador, una oportunidad de establecer una metodología que sirva para cartografiar la desertificación no solo en España, sino en todo el mundo.

La reciente declaración de Emergencia Climática del Gobierno Español (2020) implica, entre otros compromisos, desarrollar una Estrategia Nacional contra la Desertificación (ENLD) (MITERD, 2022), aprobada por el Consejo de Ministros el 21 de junio de 2022. Este documento puede interpretarse como una llamada a la acción, debido a que, lejos de desaparecer, los paisajes de desertificación anunciados en el PAND se han asentado y expandido. La ENLD proporciona un diagnóstico de la situación actual –que debe ser matizado y adecuadamente cuantificado–, y propone numerosas acciones y medidas a llevar a cabo hasta 2030. Entre ellas destaca la realización de un plan de restauración de terrenos afectados por la desertificación (para lo cual es necesario cartografiarlos), el desarrollo de una red de proyectos piloto y demostrativos de lucha contra la desertificación, la aplicación de buenas prácticas de gestión sostenible de la tierra en el sector agrario, forestal y de los recursos hídricos, y la elaboración de un ADE. Como vemos, la ENLD es un cúmulo de propuestas que es necesario desarrollar. En el ámbito de este proyecto subrayamos la ausencia de mapas de desertificación en la ENLD, lo que hace de los antiguos mapas del PAND (2008) y el mapa de condición de la tierra de 2014 los más actuales disponibles a día de hoy, pese a utilizar información de hace unos 15 años.

La otra novedad es la mencionada NDT. Veinte años después de la aprobación de las tres Convenciones de Río en la Cumbre de la Tierra de 1992, se aprobó el documento final del proceso Río+20, «el futuro que queremos» (UN, 2012), ratificando el compromiso global de: i) esforzarse por conseguir un mundo neutral en lo que concierne a la degradación de las tierras; ii) adoptar medidas coordinadas a nivel nacional, regional e internacional en el contexto de la CNULD; y iii) realizar un seguimiento global de la degradación de las tierras y restablecer las tierras degradadas en zonas áridas. Poco después, en 2015, la comunidad global llegó a un acuerdo sobre la «Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible», en la que se incluían 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y 169 metas (UN, 2015). El objetivo 15 insta a los países a proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, efectuar una gestión sostenible de los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación

de las tierras y poner freno a la pérdida de la diversidad biológica. La meta 15.3 se centra en «luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, y procurar lograr un mundo con una degradación neutra del suelo» para 2030.

La CNULD aprobó la definición de NDT como «una situación en que la cantidad y la calidad de los recursos de las tierras necesarios para sustentar las funciones y los servicios ecosistémicos e incrementar la seguridad alimentaria se mantienen estables o aumentan dentro de una determinada escala temporal y espacial». Además, solicitó a la Interfaz Ciencia-Política de la CNULD que propusiera un marco conceptual para que respalde científicamente la aplicación de la NDT. Desde entonces se han producido diversos documentos técnicos en los que se trata de aclarar en qué consiste exactamente la NDT y cómo implementarla. Entre ellos destaca el trabajo seminal de Orr et al. (2017) y la publicación de Cowie et al. (2018). Analizando estos documentos destacamos una serie de principios que justifican la necesidad de contar con mapas de desertificación y ofrecen algunos elementos para su elaboración. La NDT establece que la degradación máxima es la que había en 2015, lo que implica elaborar un mapa que muestre esta degradación. Además, la NDT trasciende las zonas áridas y considera todo el territorio. La prevención y la anticipación deben de ser las prioridades en la implementación de la NDT. Ello requiere conocer qué territorios se va a degradar y proponer medidas correctoras.

Implícitamente, esto significa tener un mapa de riesgo de desertificación (o degradación), que debe compararse con el mapa actual de desertificación. Para monitorizar los cambios en la degradación se proponen tres indicadores (cobertura terrestre, productividad de la tierra y carbono orgánico en el suelo), que formarán parte de las variables cartografiadas. La NDT considera que estos tres indicadores deben complementarse con otros que informen sobre las particularidades de cada lugar, lo que supone estudiar las bases de datos disponibles y seleccionar los indicadores que sean más útiles (p.ej., en el caso de España es necesario contar con indicadores que informen sobre el estado de las aguas subterráneas y sobre el estado de las masas superficiales, en particular los humedales). Por último, y no menos importante, la NDT advierte que la posibilidad de compensar mediante restauraciones no puede interpretarse como una licencia para degradar. Por ello los princip-

ios para llevar a cabo las compensaciones de la NDT son muy estrictos y requieren que estas acciones regenerativas tengan lugar en el mismo tipo de terreno y dentro de la subunidad de análisis territorial establecida (el país, que es la unidad de trabajo de la NDT, debe dividirse en varias subunidades).

Nos encontramos, por tanto, en una encrucijada sumamente interesante desde el punto de vista científico-técnico. La lucha contra la desertificación demanda mapas para poder abordarla. Como señala acertadamente Prince (2016): «Décadas de trabajo han mejorado nuestra comprensión de los componentes individuales de los procesos de desertificación, pero no han respondido a las tres preguntas fundamentales a escala regional y global: ¿Qué se degrada? ¿Dónde ocurre? ¿Cuál es la gravedad de la degradación?» El propio AMD reconoce que nunca hubo tanta información disponible sobre desertificación, y abre la puerta tíbiamente a encontrar algún modo fiable de combinar todas esas bases de datos para dibujar el problema en un mapa que permita tomar decisiones y ser conscientes de su magnitud.

#### EL USO DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA DETECTAR DESERTIFICACIÓN

La situación en 2022, en relación con la disponibilidad de datos y su tratamiento, respecto a finales del siglo pasado y comienzos de éste, que es de cuando datan los últimos intentos por cartografiar la desertificación, ha cambiado sustancialmente. El imparable desarrollo de la Inteligencia Artificial, su aplicación al estudio de la desertificación (Guirado & Martínez-Valderrama, 2021), y el procesamiento de datos, cada vez más abundantes, completos y accesibles, permiten sustanciar nuevas propuestas metodológicas.

El desarrollo metodológico del proyecto ATLAS (Figura 4) tiene dos fases. La primera reúne información geoespacial y bibliográfica sobre desertificación en España (que en sí misma ya es una parte del Atlas, y se divide en variables climáticas, socioeconómicas y biofísicas), y realiza un inventario de casos de desertificación en España. En cada caso se identifica el tipo de desertificación (heredada, cuando ocurrió hace décadas o siglos; activa, si se trata de un proceso de degradación actual), la localización geográ-

fica, se aportan referencias bibliográficas o documentales que permitan corroborar dicho caso, y se vincula tanto a variables que permitan cuantificar la degradación (erosión del suelo, pérdida de fertilidad, agotamiento/contaminación acuíferos, desecamiento de humedales) como a variables que expliquen esa degradación (por ejemplo, cambios en el uso del suelo o en las tecnologías y prácticas productivas). Este inventario de casos de desertificación debe completarse con casos en los que no haya degradación, datos esenciales para la segunda fase metodológica en la que se pretende pronosticar la ocurrencia de desertificación en casos no inventariados a partir de la relación de los casos inventariados con determinadas variables.

Es importante señalar que el hecho de determinar qué es degradación (o desertificación, pues nos circunscribimos a las zonas áridas) no deja de mantener ciertas dosis de ambigüedad que es imposible erradicar. El hecho de relacionar cada caso con variables objetivas de degradación pretende eliminar o minimizar este sesgo potencial, pero somos conscientes de que las nociones de degradación y restauración se basan en aspectos biofísicos, pero se construyen socialmente y, por tanto, son potencialmente muy controvertidas (Meyfroidt, Bremond, et al., 2022).

El enfoque descrito en el párrafo anterior evita diversos obstáculos que se han presentado con anterioridad cuando se ha intentado cartografiar la desertificación. Por un lado, evitamos el espinoso asunto de los umbrales de degradación, que esconden sus propias controversias. Por el otro, un ecosistema que podría ser considerado como degradado bajo cierto criterio, por ejemplo forestal, puede seguir siendo funcional y estable y no siempre es deseable restaurar el punto de partida original. Por ejemplo, las dehesas podrían ser vistas como una versión degradada de bosques de encinas y alcornoques que fueron clareados en busca de zonas de pastoreo. Sin embargo, ese aclarado dio lugar a una explosión de biodiversidad, de productividad, conformando no tanto un sistema degradado sino un ecosistema diferente. Revertir el sistema a la situación original puede perjudicar, por ejemplo, no sólo a la actividad ganadera que alberga sino también la multifuncionalidad socioeconómica y ambiental de este agroecosistema, incluyendo su biodiversidad. En segundo término, la escala espacial será variable, puesto que estos casos se pueden referir a territorios más o menos extensos, desde sierras a masas de agua subterránea. En todo caso, adop-

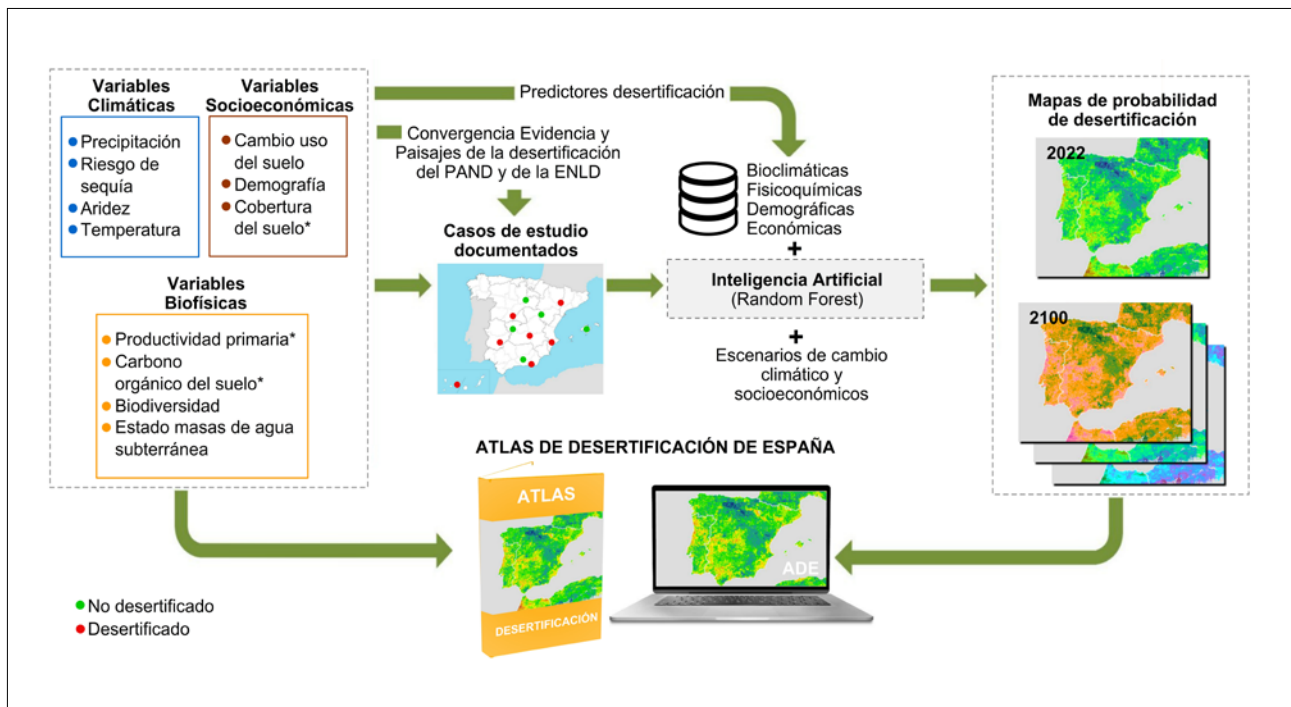


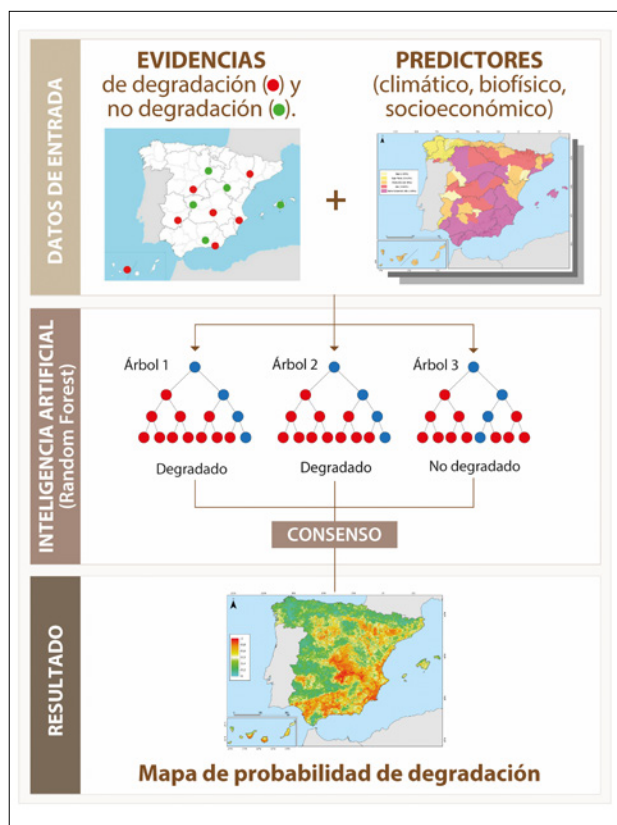
Figura 4. Esquema metodológico del proyecto ATLAS para la elaboración del Atlas de Desertificación de España. \*Indicadores de la NDT.

haremos una escala de paisaje, que es la adecuada para hablar de desertificación. Por último, la desertificación no va a ser una variable que resulte de la agregación de otras, sino una variable dicotómica en la que el territorio se va a dividir en áreas con y sin desertificación. Esta primera parte de la metodología supone un avance notorio sobre la representación espacial del problema de la desertificación en España, puesto que SURMODES se limitó a señalar las provincias en las que predominaba cierta actividad agraria que podía desembocar en problemas de desertificación. Su posterior inclusión en el PAND y la ENLD carece de representación espacial, y su valor radica en identificar las tipologías de procesos de desertificación asociadas a sus causas.

El segundo componente metodológico del proyecto ATLAS toma como base el mapa de casos de desertificación anterior para ligarlo a las diversas variables involucradas utilizando herramientas de Inteligencia Artificial. Los algoritmos de InAr necesitan aprender de la realidad para predecir a partir de una serie de variables o predictores. Esta realidad será nuestro mapa dicotómico, que le muestra al algoritmo dónde hay desertificación y dónde no la hay, y además le ofrece una serie de variables que son reflejo y expli-

cación de lo que allí ha ocurrido. Para identificar los principales predictores y la importancia de estos en la desertificación en España, llevaremos a cabo un análisis de permutación de **Random Forest** (Breiman, 2001) (Figura 5). Este análisis permite identificar los determinantes o predictores de la desertificación más importantes entre las variables previamente analizadas.

Este método es un novedoso algoritmo de aprendizaje automático, que amplía los métodos estándar de árbol de clasificación y regresión, creando una colección de árboles de clasificación con divisiones binarias. La importancia de cada variable de predicción se determina evaluando la disminución de la precisión de la predicción cuando los datos de ese predictor se permutan al azar. Esta medida de importancia de la precisión se calcula para cada árbol y se promedia. A diferencia de la inferencia multitemodelo, que utiliza regresiones lineales o análisis de árboles de regresión, el análisis de bosques aleatorios alivia los problemas de multicolinealidad en los análisis multivariantes mediante la construcción de conjuntos de árboles empaquetados y la inclusión de un subconjunto aleatorio de características para cada árbol. Estos resultados, nos ayudarían en una



**Figura 5.** Flujo de trabajo de la metodología a emplear para obtener el mapa de probabilidad de desertificación utilizando inteligencia artificial (Random Forest).

tarea clave, la asignación de pesos a los predictores de la desertificación. Con este paso solventaremos uno de los principales fallos metodológicos, que es asignar sin ninguna base estadística distintos pesos a los factores que intervienen en el proceso de desertificación. Además, este análisis nos permite tener una clasificación de los principales impulsores de la desertificación en España.

Para elaborar el mapa de probabilidad de desertificación, se emplea un análisis de regresión mediante el algoritmo Random Forest, utilizando las 10 variables predictoras más relevantes, junto con las localizaciones de zonas degradadas y no degradadas. El modelo se valida comparando los valores predichos con los observados, siguiendo la metodología propuesta por Piñeiro et al. (2008). A partir de los resultados, se generan distintos mapas de probabilidad: uno que representa la desertificación actual ( $\geq 50\%$ ) y otro que identifica áreas con predicciones menos confiables (probabilidad  $< 50\%$ ).

El umbral del 50% se utiliza comúnmente en modelos probabilísticos como criterio de decisión binaria, ya que representa el punto de equilibrio entre dos posibles estados (por ejemplo, presencia o ausencia de un fenómeno). Una probabilidad igual o superior al 50% indica que el modelo estima una mayor probabilidad de que el evento ocurra que de que no ocurra, lo que justifica su uso para identificar con mayor certeza las zonas potencialmente afectadas.

Para estimar cómo evolucionará la desertificación en España, se crean mapas que consideran la incertidumbre climática y socioeconómica. Se aplican escenarios climáticos y socioeconómicos del IPCC para los periodos 2021-2100 (Eyring et al., 2016) y se analizan cambios en usos agrícolas y urbanos del suelo según proyecciones regionales.

## CONCLUSIONES

La publicación en 2018 del tercer Atlas Mundial de Desertificación supuso el certificado de defunción de la cartografía de la degradación de las zonas áridas realizada hasta entonces. El fuerte componente subjetivo en la evaluación de este problema (del cual es imposible librarse completamente), unido a metodologías incapaces de sintetizar en un único indicador la variedad de procesos que forman parte del problema, han dejado en blanco los mapas de desertificación. Ello abre nuevas oportunidades de investigación, a pesar de que los autores del AMD propongan como alternativa los mapas la «Convergencia de Evidencias» (CE), una aproximación que realza el contexto local y regional de la desertificación y que por eso mismo excluye una mirada uniforme. La novedad de la CE se une a otra, la Neutralidad de la Degradación de las Tierras (NDT), que nos recuerda que la prevención, es decir, detectar los problemas a tiempo, es la estrategia más valiosa para abordar la desertificación.

## AGRADECIMIENTOS

El proyecto ATLAS cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU.



## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores/as de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bai, Z. G., Dent, D. L., Olsson, L., & Schaepman, M. E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24(3), 223–234. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>
- Bauer, S., & Stringer, L. C. (2009). The Role of Science in the Global Governance of Desertification. *The Journal of Environment & Development*, 18(3), 248–267. <https://doi.org/10.1177/1070496509338405>
- Beinroth, F. H., Eswaran, H., & Reich, P. F. (2001). Global assessment of land quality. In D. E. Stott, R. H. Mohtar, & G. C. Steinhardt (Eds.), *Sustaining the global farm: Selected papers from the 10th international soil conservation organization meeting* (pp. 569–574). Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Mach. Learn.*, 45, 5–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Castillo Sánchez, V. M. (2022). Ciencia y política contra la desertificación: La respuesta de las instituciones ante un reto global. *Mètode: Revista de Difusió de La Investigació*, 13, 67–73. <https://doi.org/10.7203/metode.13.21901>
- Chasek, P., Akhtar-Schuster, M., Orr, B. J., Luise, A., Rakoto Ratsimba, H., & Safriel, U. (2019). Land degradation neutrality: The science-policy interface from the UNCCD to national implementation. *Environmental Science and Policy*, 92(November 2018), 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.017>
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S., & von Maltitz, G. (2018). *World Atlas of Desertification* (M. Cherlet, C. Hutchinson, J. Reynolds, J. Hill, S. Sommer, & G. von Maltitz (eds.)). Publication Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/9205>
- Consejo de Ministros. (2022). El Gobierno aprueba la Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación para activar políticas que combatan esta amenaza en España. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-aprueba-la-estrategia-nacional-de-lucha-contra-la-desertificacion-para-activar-politicas-que-combatan-esta-amenaza-en-espana/tcm:30-541857#:~:text=Hoy%2C%20en%20Consejo%20de%20Ministros&text=El%20Gobierno>
- Cowie, A. L., Orr, B. J., Castillo Sanchez, V. M., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S., & Welton, S. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science and Policy*, 79, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.011>
- CRSTRA, & BeSafeNet. (2023). Natural Hazards Drought and Desertification. BeSafeNet - European Centre for Disaster Awareness. <https://besafenet.net/hazards/drought-and-desertification/>
- Davis, D. K. (2016). *The arid lands. History, power, knowledge*. The MIT Press.
- De Stefano, L., & Lopez-Gunn, E. (2012). Unauthorized groundwater use: Institutional, social and ethical considerations. *Water Policy*, 14(SUPPL. 1), 147–160. <https://doi.org/10.2166/wp.2012.101>
- del Barrio, G., Puigdefabregas, J., Sanjuan, M. E., Stellmes, M., & Ruiz, A. (2010). Assessment and monitoring of land condition in the Iberian Peninsula, 1989–2000. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1817–1832. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.009>
- Dregne, H. E. (1977). Generalized map of the status of desertification of arid lands. A/CONF 74/31. United Nations Conference on Desertification.
- Dregne, H. E. (1983). *Desertification of Arid Lands*. Harwood Academic Publishers.
- Dregne, H. E., & Chou, N. T. (1992). Global desertification dimensions and costs. In H. E. Dregne (Ed.), *Degradation & Restoration of Arid Lands* (pp. 249–282). Texas Tech University Press.



17. EC-European Commission. (1999). The Medalus Project: Mediterranean desertification and land use: manual on key indicators of desertification and mapping environmentally sensitive areas to desertification (C. Kosmas, M. J. Kirkby, & N. Geeson (eds.)). Directorate-General Science, Research and Development.
18. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
19. Fundación Nueva Cultura del Agua. (2020). Falcia 4. El regadío es la solución para frenar la desertificación. Desmontando Falacias Sobre Agua y Cambio Climático. <https://fnca.eu/desmontando-falacias/falacia-4/>
20. Gibbs, H. K., & Salmon, J. M. (2015). Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*, 57, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.024>
21. Gobierno de España. (2020). Declaración del Gobierno de España ante la Emergencia Climática y Ambiental.
22. Greve, P., Roderick, M. L., Ukkola, A. M., & Wada, Y. (2019). The aridity Index under global warming. *Environmental Research Letters*, 14(12), 124006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5046>
23. Guirado, E., Delgado-Baquerizo, M., Martínez-Valderrama, J., Tabik, S., Alcaraz-Segura, D., & Maestre, F. T. (2022). Climate legacies drive the distribution and future restoration potential of dryland forests. *Nature Plants*, 8(8), 879–886. <https://doi.org/10.1038/s41477-022-01198-8>
24. Guirado, E., & Martínez-Valderrama, J. (2021). Potencial de la inteligencia artificial para avanzar en el estudio de la desertificación. *Ecosistemas*, 30(3). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2250>
25. Hirche, A., Salamani, M., Abdellaoui, A., Benhouhou, S., & Valderrama, J. M. (2011). Landscape changes of desertification in arid areas: The case of south-west Algeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 179(1–4), 403–420. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1744-5>
26. Ibáñez, J., Martínez-Valderrama, J., & Puigdefábregas, J. (2008). Assessing desertification risk using system stability condition analysis. *Ecological Modelling*, 213(2), 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.11.017>
27. IPBES. (2018). The IPBES assessment report on land degradation and restoration (A. (Montanarella, L., Scholes, R., Brainich (ed.)). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.
28. IPCC. (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In: (Eds.), Geneva (J. Shukla, P.R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Portugal Pereira, J., Vyas, P., Huntley, (ed.)). Intergovernmental Panel on Climate Change.
29. Kuang, X., Liu, J., Scanlon, B. R., Jiao, J., & Jasechko, S. (2024). The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science*, 383, eadf0630. <https://doi.org/10.1126/science.adf0630>
30. Le Houerou, H. N. (1984). Rain Use Efficiency: A Unifying Concept in Arid-Land Ecology. *Journal of Arid Environments*, 7, 213–247.
31. Lepers, E., Lambin, E. F., Janetos, A. C., DeFries, R., Achard, F., Ramankutty, N., & Scholes, R. J. (2005). A synthesis of information on rapid land-cover change for the period 1981–2000. *BioScience*, 55(2), 115–124. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2005\)055\[0115:A-SOIOR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2005)055[0115:A-SOIOR]2.0.CO;2)
32. Maestre, F. T., Benito, B. M., Berdugo, M., Concostrina-Zubiri, L., Delgado-Baquerizo, M., Eldridge, D. J., Guirado, E., Gross, N., Kéfi, S., Le Bagousse-Pinguet, Y., Ochoa-Hueso, R., & Soliveres, S. (2021). Biogeography of global drylands. *New Phytologist*, 231(2), 540–558. <https://doi.org/10.1111/nph.17395>
33. MAGRAMA. (2008). Programa de Acción Nacional contra la Desertificación. Madrid. Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente.



34. Mallavan, B. P., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2010). Homosoil, a methodology for quantitative extrapolation of soil information across the globe. In J. L. Boettinger, D. W. Howell, A. C. Moore, A. E. Hartemink, & S. Kienast-Brown (Eds.), *Digital Soil Mapping* (pp. 137–150). Springer Dordrecht.
35. Martínez-Valderrama, J. (2024). Desertificación, cuando el territorio hace aguas. *Tirant lo Blanch*.
36. Martínez-Valderrama, J., del Barrio, G., Sanjuán, M. E., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2022). Desertification in Spain: A Sound Diagnosis without Solutions and New Scenarios. *Land*, 11(2), 272. <https://doi.org/10.3390/land11020272>
37. Martínez-Valderrama, J., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2022). La vida adaptada a la precariedad: Ecología de las zonas áridas. *Mètode : Revista de Difusió de La Investigació*, 13, 59–65. <https://doi.org/10.7203/metode.13.22006>
38. Martínez-Valderrama, J., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2020a). Desertifying deserts. *Nature Sustainability*, 3, 572–575. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0561-2>
39. Martínez-Valderrama, J., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2020b). Unraveling misunderstandings about desertification: the paradoxical case of the Tabernas-Sorbas Basin in Southeast Spain. *Land*, 9, 269. <https://doi.org/10.3390/land9080269>
40. Martínez-Valderrama, J., Guirado, E., & Maestre, F. T. (2021). ¿Se puede cartografiar la desertificación? Luces y sombras de una tarea desafiante. *Ecosistemas*, 30(3). <https://doi.org/10.7818/ECOS.2211>
41. Martínez-Valderrama, J., Ibáñez, J., Del Barrio, G., Alcalá, F. J., Sanjuán, M. E., Ruiz, A., Hirche, A., & Puigdefábregas, J. (2018). Doomed to collapse: Why Algerian steppe rangelands are overgrazed and some lessons to help land-use transitions. *Science of the Total Environment*, 613–614, 1489–1497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.058>
42. Martínez-Valderrama, J., Ibáñez, J., Del Barrio, G., Sanjuán, M. E., Alcalá, F. J., Martínez-Vicente, S., Ruiz, A., & Puigdefábregas, J. (2016). Present and future of desertification in Spain: Implementation of a surveillance system to prevent land degradation. *Science of The Total Environment*, 563–564, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.065>
43. Martínez-Valderrama, J., Olcina, J., Gartzia, R., Guirado, E., Ibáñez, J., & Maestre, F. T. (2023). Uberizing agriculture in drylands: A few enriched, everyone endangered. *Water Resources Management*, 38, 193–214. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03663-1>
44. Martínez Fernández, J., Esteve-Selma, M. Á., Contreras, S., & Bru Ronda, C. (2002). Agua, regadío y sostenibilidad en el Sudeste ibérico (J. Martínez Fernández & M. Á. Esteve-Selma (eds.)). *Bakeaz*.
45. Mehta, P., Siebert, S., Kummu, M., Deng, Q., Ali, T., Marston, L., Xie, W., & Davis, K. F. (2024). Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions. *Nature Water*. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00206-9>
46. Meyfroidt, P., Bremond, A. De, Ryan, C. M., Archer, E., Aspinall, R., & Erb, K. (2022). Ten facts about land systems for sustainability. *PNAS*, 119(7), 1–12. <https://doi.org/10.1073/pnas.2109217118>
47. Meyfroidt, P., Ryan, C. M., & Aspinall, R. (2022). Ten facts about land systems for sustainability. *PNAS*, 119(7), e2109217118.
48. Middleton, N., Stringer, L., Goudie, A., & Thomas, D. S. G. (2011). *The Forgotten Billion: MDG achievement in the drylands*.
49. Millenium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Dryland Systems*. In R. Hassan, R. Scholes, & N. Ash (Eds.), *Ecosystems and Human Well-Being: Scenarios* (pp. 623–662). Island Press.
50. MITERD. (2022). *Estrategia Nacional de Lucha contra la Desertificación en España*. 159.
51. Nachtergaele, F. O., Petri, M., Biancalani, R., van Lynden, G., van Velthuisen, H., & Bloise, M. (2011). *An Information database for land degradation assessment at global level. Global land degradation information system (GLADIS)*.
52. Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., Sombroek, W. G. (1991). *World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note. Global Assessment of Soil Degradation (GLASOD) (2nd ed.)*. Wageningen Winand Staring Center, International Society for Soil Science, FAO, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science.



53. Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo, V. M., Sanchez, P., Chasek, N. D., Crossman, Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G. I., Minelli, S., Tengberg, A. E., Walter, S., & Welton, S. (2017). Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A report of the Science-Policy Interface. In United Nations Convention to Combat Desertification - UNCCD.
54. Perevolotsky, A., & Seligman, N. G. (1998). Role of grazing in Mediterranean rangeland ecosystems - Inversion of a paradigm. *Bioscience*, 48(12), 1007–1017.
55. Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J. P., & Paruelo, J. M. (2008). How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, 216, 316–322.
56. Prince, S. D. (2016). Where Does Desertification Occur? Mapping Dryland Degradation at Regional to Global Scales. In R. Behnke & M. Mortimore (Eds.), *The End of Desertification? Disputing Environmental Change in the Drylands* (pp. 225–263). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-16014-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16014-1_9)
57. Prince, S. D., & Podwojewski, P. (2019). Desertification: Inappropriate images lead to inappropriate actions. *Land Degradation & Development*, 31(6), 677–682. <https://doi.org/10.1002/ldr.3436>
58. Puigdefábregas, J. (1995). Erosión y desertificación en España. *Campo*, 132, 63–83.
59. Puigdefábregas, J., & del Barrio, G. (2000). SUR-MODES: a Surveillance System for Assessing and Monitoring of Desertification (CD ROM).
60. Reynolds, J. F. (2021). Desertification is a prisoner of history: An essay on why young scientists should care. *Ecosistemas*, 30(3), 2302. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2302>
61. Reynolds, J. F., & Stafford Smith, M. (2002). Do Humans Cause Deserts? In J. Reynolds & M. Stafford Smith (Eds.), *Global Desertification. Do Human Cause Deserts* (pp. 1–21). Dahlem University Press.
62. Safriel, U. (2007). The assessment of global trends in land degradation. In M. Sivakumar & N. Ndiang'ui (Eds.), *Climate and land degradation* (pp. 1–38). Springer.
63. Sancho Comíns, J., & Olcina Cantos, J. (2020). De la geografía a los atlas y de los atlas a la geografía. *Estudios Geograficos*, 81(288), e042.
64. Sanjuán, M. E., Barrio, G. del, Ruiz, A., Rojo, L., Puigdefábregas, J., & Martínez, A. (2014). Evaluación y seguimiento de la desertificación en España: Mapa de la Condición de la Tierra 2000-2010. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (España). <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/10575>
65. Sterk, G., & Stoorvogel, J. J. (2020). Desertification—Scientific Versus Political Realities. *Land*, 9(156), 1–18. <https://doi.org/10.3390/land9060156>
66. Tucker, C. J., Justice, C. O., & Prince, S. D. (1986). Monitoring the grasslands of the Sahel 1984–1985. *Int. J. Remote Sens.*, 7, 1571–1581.
67. Turner, M. D., Davis, D. K., Yeh, E. T., Hiernaux, P., Loizeaux, E. R., Fornof, E. M., Rice, A. M., & Suter, A. K. (2023). Great Green Walls: Hype, Myth, and Science. *Annual Review of Environment and Resources*, 48, 263–287. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-111102>
68. UN (United Nations). (2012). Future We Want - Outcome document. <https://sustainabledevelopment.un.org/futurewewant.html>
69. UN (United Nations). (2015). Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Gen. Assem. 70 Sess.
70. UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). (2017). United Nations Convention to Combat Desertification. 2017. The Global Land Outlook, first edition.
71. UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). (2022). Global Land Outlook. Land Restoration for Recovery and Resilience (Second ed.). UNCCD.
72. UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification). (1994). United Nations Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa.
73. UNEP (United Nations Environmental Programme). (1997). World Atlas of Desertification: Second Edition (N. Middleton & D. Thomas (eds.)). UNEP.



74. UNEP (United Nations Environmental Programme). (1992). World Atlas of Desertification (N. Middleton & D. Thomas (eds.)). Edward Arnold Publishers..
75. Verón, S. R., Paruelo, J. M., & Oesterheld, M. (2006). Assessing desertification. *Journal of Arid Environments*, 66(4), 751–763. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.01.021>
76. Wang, L., Jiao, W., Macbean, N., Rulli, M. C., Manzoni, S., Vico, G., & Odorico, P. D. (2022). Dryland productivity under a changing climate. *Nature Clim. Change*, 12, 981–994. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01499-y>
77. Wu, S., Liu, L., Li, D., Zhang, W., Liu, K., Shen, J., & Zhang, L. (2023). Global desert expansion during the 21st century: Patterns, predictors and signals. *Land Degradation and Development*, 34(2), 377–388. <https://doi.org/10.1002/ldr.4466>

---

**Si desea citar nuestro artículo:**

Martínez-Valderrama J, Guirado E, Olcina J, Varela E, Martínez-Fernández J, Lucas-Borja ME, Martí-Talavera J, Cintas J, Maestre FT. M. El Atlas de la desertificación de España, un primer paso para atajar la degradación de la tierra. *RACSG*.2025;113(01):5-21 [rac.2025.113.1.org01](https://doi.org/10.1002/rac.2025.113.1.org01)

## ORIGINAL

# SOBRE ECONOMÍA Y LAS CIENCIAS MATEMÁTICAS, FÍSICAS Y NATURALES

## ON ECONOMICS AND MATHEMATICAL, PHYSICAL AND NATURAL SCIENCES

Jose M. Vidal-Sanz<sup>1</sup>

1. Universidad Carlos III de Madrid

### RESUMEN

El desarrollo de la matemática, la física y otras ciencias naturales ha influido significativamente en la economía como disciplina académica. En ocasiones, esta influencia ha sido bidireccional, especialmente en el campo de la matemática aplicada o la ingeniería. En este trabajo se examinan estas conexiones, a la par que se proporciona una breve introducción al análisis económico.

**Palabras clave:** Modelos de equilibrio; Microeconomía; Macroeconomía; Ciencia.

### ABSTRACT

The development of mathematics, physics, and other natural sciences has significantly influenced economics as an academic discipline. Sometimes, this influence has been bidirectional, especially in the field of applied mathematics or engineering. This paper examines these connections, while also providing a brief introduction to economic analysis.

**Keywords:** Equilibrium models; Microeconomics; Macroeconomics; Science.

### Correspondencia

Jose M. Vidal-Sanz

Universidad Carlos III de Madrid

E-mail: jvidal@emp.uc3m.es

### SOBRE EL ORIGEN DE LA DISCIPLINA ECONÓMICA

La *economía* es una ciencia social que estudia cómo las sociedades gestionan y transforman los bienes (productos y servicios) de que disponen, que son limitados, y cómo los asignan a los consumidores para que puedan gratificar o satisfacer sus necesidades, mejorando el bienestar social. Si la publicación de los *Philosophiæ naturalis principia mathematica* de Sir Isaac Newton en el siglo XVI supuso una revolución en la forma de estudiar los fenómenos naturales por medio de modelos matemáticos axiomáticos, las ciencias sociales tardaron mucho más tiempo en adoptar enfoques analíticos comparables, siendo la *economía* la

disciplina social que siguió estos pasos de forma más marcada.

Suele atribuirse el nacimiento de la economía como disciplina al pensador escocés Adam Smith (1759, 1776), cuyas ideas fueron complementadas por las contribuciones de múltiples intelectuales a lo largo de los siglos XVIII y XIX (por ejemplo, Jean-Baptiste Say, David Ricardo, Karl Marx, Thomas Malthus, William Petty, Jeremy Bentham, John Stuart Mill, entre otros). Se suele agrupar a estos autores bajo la etiqueta de economistas clásicos (Figura 1). Sus contribuciones son ricas en ideas e intuiciones, y por tanto han tenido una duradera influencia (no solo en la economía contemporánea sino incluso en nuestra concepción del funcionamiento de las sociedades). La aportación de estos

autores está fuertemente influida por el desarrollo del método científico, pero no utilizan modelos de análisis formales (véase Redman 1997). Adam Smith está aparentemente más influido por el trabajo experimental de Newton en *Opticks*, que por la modelización de los *Principia Mathematica*. La economía basada en modelos formales aún tardaría en desarrollarse, y lo haría inspirada en parte los desarrollos de la física y también de las matemáticas.

otros, cabe destacar la contribución al estudio de la decisión individual del consumidor de Carl Menger (Menger, 1871) y Francis Ysidro Edgeworth (Edgeworth, 1881), así como la de Alfred Marshall, quien desde la Universidad de Cambridge proporciona un gran empuje al uso del cálculo diferencial en economía (un enfoque conocido como *marginalismo*), y que en su tratado *Principios de Economía* (Marshall, 1890) populariza la representación gráfica de la oferta

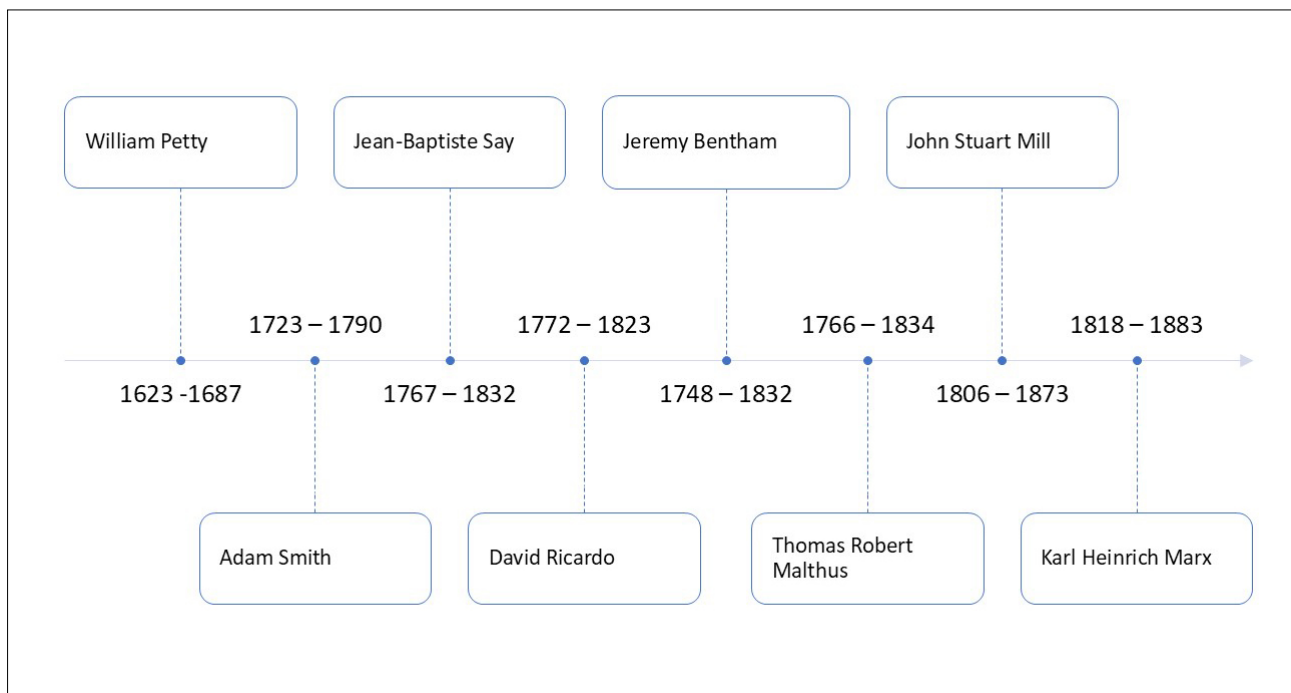


Figura 1. Principales economistas clásicos

¿Cómo se inicia la formalización del pensamiento económico clásico? A finales del siglo XIX, surge una nueva oleada de economistas neoclásicos que comienza a utilizar sistemáticamente ecuaciones matemáticas para reflejar el comportamiento de los agentes que operan en una economía (consumidores, empresas, estados), y el equilibrio que permite compatibilizar dichas fuerzas como la solución del sistema de ecuaciones. La mayoría de estos modelos no se centran tanto en describir el proceso por el que se alcanza el equilibrio, como en caracterizarlo analíticamente, y en estudiar cómo pequeños cambios en factores exógenos al sistema económico pueden afectar al equilibrio. Esta línea de trabajo se extiende hasta bien entrado el siglo XX (véase la Figura 2). Entre

y la demanda como unas tijeras cuyo cruce determina el equilibrio competitivo (Figura 4). Dicha representación había sido introducida por Augustin Cournot (1838), e influyó de forma temprana en las escuelas de ingeniería (Jenking 1870, Dupuit 1844). También cabe destacar el trabajo de Leon Walras de la escuela de Lausana, que introduce la noción de equilibrio general de una economía competitiva en la que muchos agentes (consumidores y empresas) toman decisiones perfectamente racionales a partir de los precios que observan en el mercado, y usa sistemas de ecuaciones para determinar los precios de equilibrio que hacen compatibles todas las decisiones (Walras, 1874). Mientras que en el modelo de Walras los agentes toman los precios del mercado como dados, el

marginalista francés Antoine Augustin Cournot (1838) considera un mercado oligopolista con pocas empresas que se comportan estratégicamente tratando de influir en los precios. El precio de equilibrio de Cournot es un caso particular de *equilibrio de Nash* introducido por John Forbes Nash (1951) en el contexto de la *teoría de los juegos* no cooperativos. Bertrand (1883a, 1883b) critica el trabajo de Walras y Cournot, y propone otro modelo oligopolista con un tipo de equilibrio alternativo, que también es un caso particular de equilibrio de Nash. Vilfredo Federico Pareto (1896-1897) desarrolla el concepto de eficiencia de una asignación económica, y posteriormente estudia la distribución de la renta (Pareto, 1906). Veblen (1900) acuña el término de economistas neoclásicos para estos autores. Otro economista neoclásico relevante es Irving Fisher, que estudia conceptos dinámicos y financieros básicos para la disciplina (Fisher, 1906, 1907, 1930). Unos años más tarde Wassily Leontief explora la interrelación entre distintas empresas actuando a la vez como productoras y compradoras de bienes intermedios (Leontief 1936). El economista británico John Richard Hicks (1939) proporciona un gran empuje a la teoría del consumidor, basado en la noción de función de utilidad ordinal.

Desde la segunda mitad del siglo XX, la visión de un modelo económico deriva principalmente de la monografía *Principles of Economics* de Paul Samuelson (1947). Está basada en su propia tesis doctoral, y proporciona una perspectiva sintética de los anteriores modelos, teniendo una prolongada influencia a lo largo de múltiples ediciones. Samuelson es muy receptivo a la influencia de la física (de hecho, el propio nombre del texto, al igual que el de la monografía de Alfred Marshall, es una reminiscencia de los *principia mathematica* de Sir Isaac Newton).

A lo largo de este trabajo se introducen aspectos clave de la modelización económica, y se exploran sus conexiones con otras disciplinas científicas

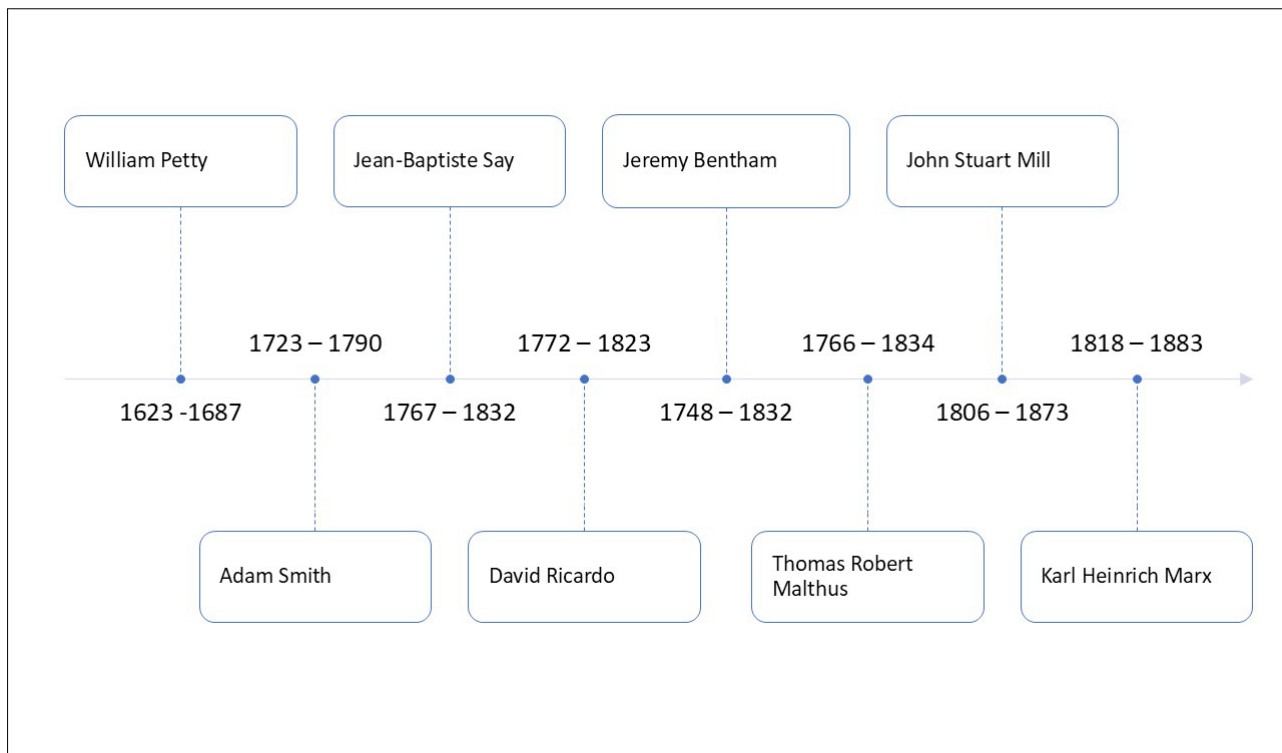


Figura 2. Economistas neoclásicos.



## LOS MODELOS ECONÓMICOS Y EL EQUILIBRIO

En esencia, un modelo económico considera un espacio vectorial para representar las posibles acciones de los agentes, y por tanto los posibles estados del sistema económico. Los modelos más sencillos utilizan un espacio vectorial Euclídeo, donde un vector  $y$  representa un número finito de variables económicas. Por ejemplo, las decisiones de consumo o producción de distintos bienes por parte de consumidores y empresas (que son los agentes económicos básicos). En economía se tratan las unidades de un mismo bien, pero disponibles en distintos periodos de tiempo o localizaciones como si bienes diferentes. Por ello, distintas coordenadas de  $y$  pueden utilizarse para decisiones sobre un producto en distintos lugares del espacio o el tiempo. También pueden incluirse en el vector  $y$  otras variables, como los precios a los que los bienes son intercambiados en el mercado. Pero trabajar en dimensión finita limita el tipo de análisis que se puede considerar. Los modelos más sofisticados consideran espacios vectoriales de dimensión infinita; por ejemplo, pueden ser espacios formados por sucesiones (para reflejar un plan de consumo o producción a lo largo de periodos temporales discretos) o espacios formados por funciones (si las decisiones se planifican en tiempo continuo), o espacios formados por procesos estocásticos (para incorporar la aleatoriedad inherente a muchas decisiones dinámicas).

Una vez fijado el espacio, el equilibrio  $y^*$  es un elemento que resuelve un sistema de ecuaciones  $G(y) = 0$  (en algunos modelos  $G$  es una correspondencia, y el equilibrio se define requiriendo que  $0 \in G(y)$ , pero aquí no voy a enfatizar este caso). Normalmente, las distintas ecuaciones que forman parte de  $G(y)$  describen el comportamiento de agentes económicos distintos. En equilibrio, el sistema de ecuaciones impone la compatibilidad de las decisiones de los distintos agentes. El sistema de ecuaciones normalmente es no lineal, y para demostrar que tiene al menos una solución se utiliza alguno de los teoremas matemáticos de punto fijo<sup>1</sup>, y los requerimientos de este tipo de teoremas han influido

en el diseño de los modelos que suelen construirse en economía. Un ejemplo temprano del uso de teoremas del punto fijo es el trabajo del matemático John von Neumann (1937) para demostrar la existencia de cierto tipo de equilibrios en *teoría de los juegos*, también resultados no publicados de Abraham Wald (Düppe y Weintraub, 2016). En modelos relativamente sencillos, a veces puede utilizarse otro tipo de herramientas más simples para probar la existencia (véase por ejemplo Wald, 1951, Greenberg, 1977, Barbolla and Corchón, 1989).

Normalmente, la resolución práctica del sistema de ecuaciones requiere el uso de técnicas computacionales numéricas, excepto para los modelos más simples que suelen tener objetivos pedagógicos. En el caso concreto es que  $G(y)$  es continuamente diferenciable en  $y^*$  y el Jacobiano  $\partial G(y^*)/\partial y$  tiene rango completo  $y^*$  es localmente único (en un entorno de dicho punto no hay ningún otro equilibrio), y puede utilizarse el algoritmo de *Newton-Raphson* para resolver el sistema numéricamente. Judd (1998) proporciona una panorámica de los principales métodos numéricos utilizados en economía.

Tipos de espacios vectoriales diferentes pueden requerir herramientas matemáticas distintas, por ejemplo, en un modelo en tiempo continuo el sistema de ecuaciones puede incluir ecuaciones diferenciales. Los modelos que se enseñan en cursos introductorios suelen ser relativamente sencillos, considerando un número finito de decisiones en un contexto relativamente estático, y se trabaja en espacios vectoriales Euclídeos. Algunos modelos se centran en aspectos muy específicos de la economía, por ejemplo, una empresa o sector pequeño, o un grupo específico de consumidores. Los modelos que incluyen todos los mercados posibles (todos los agentes y todas sus decisiones) se denominan de *equilibrio general*, por contra modelos especializados en un pequeño mercado que consideran todas las otras decisiones como fijadas (por otras personas y comportamientos/ ecuaciones a las que no se prestará atención) se conocen como modelos de *equilibrio parcial*.

<sup>1</sup> Por ejemplo, el teorema de punto fijo de Brouwer establece que una función continua  $f(y)$  definida desde un conjunto no vacío convexo y compacto sobre sí misma, tiene al menos un punto fijo  $y^* = f(y^*)$ , el nombre de punto fijo enfatiza que al aplicar  $f$  este punto no cambia. Tomando

$f(y) = y - G(y)$  el teorema de punto fijo garantiza la existencia de una solución  $y^*$  a la ecuación  $G(y) = 0$ . No obstante, el equilibrio  $y^*$  puede no ser único.

## ESTÁTICA COMPARATIVA Y LA TERMODINÁMICA

Un sistema económico puede verse afectado por el estado de variables  $z^0$  exógenas a la economía (o consideradas como fijadas en un subsistema económico externo, si estamos en un contexto de equilibrio parcial), y por tanto es conveniente modelar el equilibrio  $y^*$  como la solución de un sistema de ecuaciones

$$G(y, z^0) = 0,$$

que bajo condiciones adecuadas de regularidad tendrá soluciones localmente únicas. Bajo las condiciones del *teorema de la función implícita*, existe una función  $y(z)$  diferenciable en  $z^0$ , que pasa por el punto  $(y^*, z^0)$ , y que proporciona el equilibrio  $G(y(z), z) = 0$  para todo  $z$  en un entorno de  $z^0$ . El teorema permite estudiar el impacto de pequeños cambios en las variables exógenas  $z$  sobre el equilibrio. Concretamente, si consideramos un espacio Euclídeo, la aproximación diferencial vendría dada por

$$y(z) = y^* + \left[ - \left( \frac{\partial}{\partial y} G(y^*, z^0) \right)^{-1} \frac{\partial}{\partial z} G(y^*, z^0) \right] \cdot (z - z^0) + o(\|z - z^0\|).$$

(expresando el Jacobiano  $\partial y(z^0)/\partial z$  dentro del corchete). En algunos casos podemos interpretar  $z$  como una variable que puede ser controlada por la autoridad económica para influir en el equilibrio, dirigiéndolo hacia valores preferibles respecto a algún criterio social. En este sentido, la derivada  $\partial y(z)/\partial z$  se interpreta como un factor multiplicador del cambio  $(z - z^0)$  implementado por la política económica. Es importante remarcar que la interpretación del multiplicador es adecuada solo si el modelo  $G(y, z)$  recoge correctamente el cambio en el comportamiento de los agentes de la economía ante cambios de la variable  $z$ . Esta tarea no siempre es sencilla, depende del grado de racionalidad que posean, y la influencia puede ser distinta en el corto y el largo plazo. Si nos dejamos fuera del modelo aspectos relevantes, el modelo predecirá mal. Si metemos demasiados aspectos, el modelo será difícilmente aplicable. El grado de complejidad del modelo depende de los objetivos del analista.

Los modelos de equilibrio más utilizados no analizan en detalle el proceso por el que la economía se mueve hacia un equilibrio. Adam Smith describe literariamente este proceso de ajuste como la mano invisible de la economía refiriéndose a las múltiples

acciones de todos los agentes, que actúan en la economía como un sistema que se autocorrigie hacia su equilibrio. Si el interés del investigador se centra en mercados que suelen encontrarse en equilibrio, estos modelos son suficientes. Pero cuando aparecen desequilibrios frecuentes y tardan un largo periodo de tiempo en ajustarse, entonces es preferible considerar modelos que estudien el desequilibrio, y la estabilidad de los equilibrios locales en el sistema dinámico. Un ejemplo temprano es el modelo Cobweb o de telaraña (Ezekiel 1938, Samuelson 1941).

Un modelo económico normalmente no solo depende de variables exógenas  $z^0$ , también puede depender de ciertos parámetros  $\theta$  que permiten ajustar el sistema a un conjunto de datos mejorando la precisión del análisis, por lo que podemos reformular el equilibrio como la solución de  $G(y, z^0, \theta^0) = 0$ . Incluso si suponemos que no hay cambios en las variables exógenas  $z^0$ , los agentes podrían ocasionalmente cambiar su comportamiento y si es así podemos considerar el equilibrio como una función implícita  $y^*(\theta)$  en un entorno de  $\theta^0$  y estudiar la sensibilidad del equilibrio a cambios en los parámetros  $\partial y^*(\theta)/\partial \theta$  y la aproximación diferencial, similarmente al caso de variables exógenas. Este tipo de análisis se conoce en economía como *estática comparativa*, porque se refiere a la comparación de equilibrios en situaciones contemporáneas diferentes, pero relativamente cercanas. El influyente economista Paul Samuelson introdujo y desarrolló en profundidad el uso de la *estática comparativa* inspirado en el principio de *termodinámica* de Le Châtelier (Samuelson 1941, 1960); para una discusión más detallada sobre dicha influencia, véase Kusumoto (1976) y Milgrom (2006). La idea es diferenciar la ecuación de equilibrio,  $\frac{\partial}{\partial y} G(y, z^0) dy + \frac{\partial}{\partial z} G(y, z^0) dz = 0$ , las perturbaciones en  $z$  generan movimientos tendentes a reestablecer el equilibrio, como ilustra la Figura 3.

Puede haber múltiples equilibrios localmente únicos, y para cada uno de ellos se puede analizar su comportamiento local. Una economía puede cambiar abruptamente entre ellos sin que sea necesaria una modificación en  $z^0$  o  $\theta^0$ , típicamente debido a algún aspecto no incluido en el modelo. Sin embargo, los cambios en el equilibrio a menudo se asocian a cambios en parámetros  $\theta^0$  (denominados cambios estructurales) o en los factores externos  $z^0$ . Estos cambios suelen ser moderados, y de ahí el interés de la *estática comparativa*.

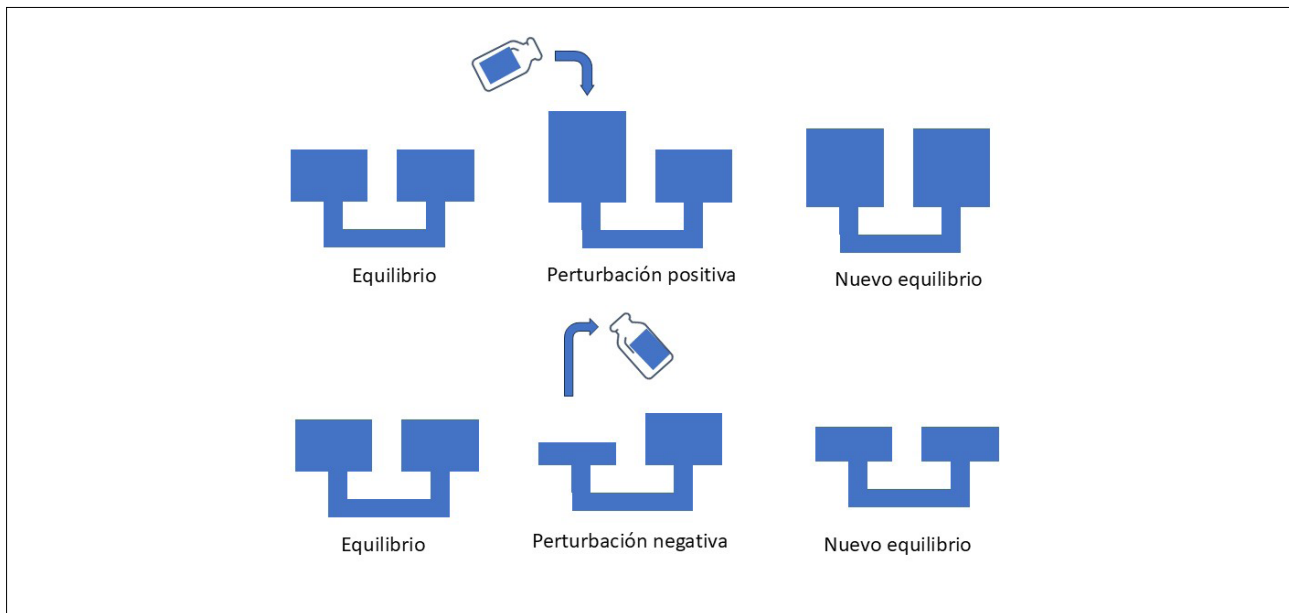


Figura 3. El principio de Le Chatelier ilustrado mediante vasos comunicantes.

## ANÁLISIS EMPÍRICO

Anteriormente se ha descrito el equilibrio en un contexto esencialmente determinista. Pero las economías pueden verse afectadas por shocks exógenos aleatorios  $u$  inobservables e impredecibles (suelen tener media cero, condicionalmente en  $z$ ), por lo que podemos considerar modelos donde el equilibrio resuelve un sistema de ecuaciones del tipo

$$G(y, z, \theta^0) = u.$$

que depende de parámetros  $\theta^0$  desconocidos. La *econometría* (rama de economía más cercana de la estadística) estudia como estimar el vector de parámetros  $\theta^0$  a partir de una muestra de observaciones de  $(y, z)$ , para que el modelo ajuste óptimamente a los datos conforme a algún criterio estadístico. Es interesante hacer notar la relación temprana entre la economía y la estadística; por ejemplo, el economista escocés William Playfair suele considerarse como la primera persona en utilizar un histograma. Menos conocida es la contribución del economista Francis Ysidro Edgeworth, quien introduce el estimador de *máxima verosimilitud* (véase Neyman 1951, 1961, Pratt, 1976, Hald 1999). El matemático Carl Friedrich Gauss había introducido previamente algunos métodos relacionados. El estimador de máxima verosimilitud es una de las herramientas fundamentales de la estadística, popularizado por Sir Ronald A. Fisher (Fisher 1925a, 1925b, 1935).

Para estimar un modelo estructural usando máxima verosimilitud, suele suponerse una distribución de probabilidad condicional  $f(u|z)$  para el error  $u$ , que normalmente satisface  $E[u|z] = 0$  (dado que un buen modelo estructural no deja un elemento predecible en el error). Posiblemente  $u$  es estadísticamente independiente de  $z$ . Bajo condiciones de regularidad  $G(y, z, \theta^0) = u$  define una función inversa  $y = H(z, u, \theta^0)$  (que puede utilizarse en estudios de simulación para estudiar la probabilidad condicional  $y|z$ ), y la función de densidad condicional de  $y|z$  viene dada por

$$f(y|z, \theta^0) = f(G(y, z, \theta^0)|z) \left| \frac{\partial G(y, z, \theta^0)}{\partial y} \right|,$$

donde el último factor del lado derecho es el determinante de la matriz Jacobiana de  $G(y, z, \theta)$ . No obstante, para la estimación es importante que no haya un número redundante de parámetros. El requisito es que haya un único vector  $\theta^0$  compatible con esta distribución (esto se conoce como *identificación*, y existen condiciones que lo garantizan y pueden chequearse en el modelo).

Si el modelo está identificado, dada una muestra  $\{(y_t, z_t)\}_{t=1}^T$  de observaciones *idéntica e independientemente distribuidas* (i.i.d.) podemos maximizar (el logaritmo de) la *función de verosimilitud condicional*, es decir maximizar

$$l_T(\theta) = \sum_{t=1}^T \ln f(y_t|z_t, \theta) = \sum_{t=1}^T \ln \left| \frac{\partial G(y_t, z_t, \theta)}{\partial y} \right| + \sum_{t=1}^T \ln f(G(y_t, z_t, \theta)|z_t).$$

Las condiciones i.i.d. pueden relajarse en muchos sentidos. El físico Jan Tinbergen contribuyó al desarrollo de modelos econométricos dinámicos. Bajo condiciones de regularidad, el estimador  $\hat{\theta}_T$  (el argumento que maximiza la verosimilitud) es consistente respecto al vector de parámetros  $\theta^0$  y tiene una distribución asintótica normal. Alternativamente, pueden utilizarse métodos de estimación Bayesiana. Estos estimadores consideran una función de densidad  $\pi(\theta)$  arbitraria, llamada distribución a priori. Si  $\pi(\theta)$  es continua y  $\pi(\theta^0) > 0$ , bajo condiciones de regularidad la densidad a posteriori

$$\pi(\theta | \{(y_t, z_t)\}_{t=1}^T) = \frac{\pi(\theta) \prod_{t=1}^T f(y_t | z_t, \theta)}{\int \pi(\theta) \prod_{t=1}^T f(y_t | z_t, \theta) d\theta} = \frac{\pi(\theta) e^{l_T(\theta)}}{\int \pi(\theta) e^{l_T(\theta)} d\theta}$$

converge a una distribución degenerada en  $\theta^0$  cuando  $T$  tiende a infinito (la consistencia de los estimadores Bayesianos se conocen como teorema de von Mises-Doob). Por tanto, podemos tomar una realización de dicha distribución como estimador (cuando  $T$  es suficientemente grande). Además, estos estimadores tienen un comportamiento similar a máxima verosimilitud en grandes muestras (la normalidad asintótica de los estimadores Bayesianos se conoce como teorema de Bernstein-von Mises).

Otro tipo de metodología empírica relevante son los experimentos. Por ejemplo, existe literatura experimental donde los participantes simulan un mercado competitivo en un laboratorio, y se usan los datos para estudiar el equilibrio (por ejemplo, Smith 1962, 1989). Para testear efectos causales, se utilizan experimentos aleatorizados siguiendo el enfoque introducido por Sir Ronald A. Fisher (1926, 1935). Banerjee y Duflo (2017) presentan distintos ejemplos en tratamientos que tratan de aliviar la pobreza. Pero en muchos casos, es poco factible usar experimentos aleatorizados. La econometría ha desarrollado técnicas que tratan de corregir los sesgos derivados de la falta de aleatorización (véase, por ejemplo, Angrist y Pischke 2009, 2010, 2015); aunque se requieren hipótesis más fuertes sobre el sistema estudiado. Para una panorámica general sobre métodos de investigación en ciencias sociales, véase Esteban-Bravo y Vidal-Sanz (2021).

## MODELO ESTÁNDAR DE UNA ECONOMÍA COMPETITIVA

Este modelo refleja el planteamiento neoclásico. Un número elevado de agentes toman decisiones racionales sobre consumo o producción de bienes (productos y servicios) basándose en los precios que observan en el mercado (por ello se dice que son precio-aceptantes). Cuando se incluyen todos los mercados de la economía hablamos de modelos de equilibrio general, y el prototipo moderno vendría dado por la contribución de Arrow y Debreu (1954) y Debreu (1959). Dicho modelo no incluye la dinámica o los aspectos financieros de forma realista, y la literatura posterior ha desarrollado extensiones que cubren estos aspectos. Aquí se introduce una versión relativamente estándar, con un número finito de agentes económicos y de variables de decisión. En este contexto, podemos considerar  $I$  consumidores y  $J$  empresas, que toman respectivamente decisiones de consumo y producción sobre  $n$  bienes, donde  $n = L \times E \times T \times S$  refleja  $L$  distintos productos y servicios (que se diferencian en sus atributos), en  $T$  distintos periodos de tiempo, en  $E$  localizaciones (una forma básica sería considerar países), bajo  $S$  posibles sucesos elementales de la naturaleza (donde solo uno sucederá de forma aleatoria, cada uno con cierta probabilidad).

## LOS AGENTES ECONÓMICOS

Las empresas y los consumidores toman respectivamente decisiones racionales de producción y consumo para cada posible vector de precios  $p \neq 0$ , donde todos los precios son no negativos. A lo largo de esta sección, denotaremos por  $y_j$  los planes de producción de la empresa  $j = 1, \dots, J$ , y por  $x_i$  los planes de consumo del consumidor  $i = 1, \dots, I$ , respectivamente. Obsérvese que, en las secciones previas, al tratar el equilibrio se había utilizado  $y$  como un vector genérico. No obstante, en el modelo competitivo estándar esta letra suele utilizarse para las decisiones de la empresa, y en lo sucesivo mantendremos este criterio.

**A) Las empresas** poseen una tecnología que les permite transformar unos bienes en otros. Las transformaciones posibles se representan por un



conjunto  $\mathbb{Y}_j \subset \mathbb{R}^n$ , donde las coordenadas negativas representan unidades de factores productivos utilizados (inputs), y las positivas unidades de bienes producidos (outputs). También se asume que  $\mathbb{Y}_j$  es (estrictamente) convexo, satisface que  $\mathbb{Y}_j \cap \mathbb{R}_+^n \subset \{0\}$  (para indicar que es imposible producir un output sin usar un input), y contiene al zero,  $0 \in \mathbb{Y}_j$  (lo que se conoce como posibilidad de inacción, y asegura que  $\mathbb{Y}_j$  no es vacío), y también se asume  $\mathbb{Y}_j - \mathbb{R}_+^n \subset \mathbb{Y}_j$  (la posibilidad de eliminar libremente cualquier bien). Normalmente la tecnología se parametriza usando un conjunto de desigualdades como

$$\mathbb{Y}_j = \{y_j : F_j(y_j) \geq 0\},$$

donde las decisiones de producción eficientes están en la frontera (es decir, cumplen  $F_j(y_j) = 0$ ). Por ejemplo, si  $F_j(y_j) = A_j y_j - b_j$  el conjunto de producción estaría determinado por desigualdades lineales. Dada la tecnología disponible, si la empresa observa un vector de precios  $p \geq 0$  con  $p \neq 0$ , se asume que el objetivo de la empresa es maximizar el beneficio  $p \cdot y_j$  sujeto a la restricción tecnológica, es decir la empresa  $j$  escoge el plan de producción que resuelve el problema

$$\max_{y_j} \{p \cdot y_j : F_j(y_j) \geq 0\}$$

Bajo condiciones de regularidad, la solución puede caracterizarse mediante las condiciones necesarias de Karush-Kuhn-Tucker (Karush, 1939, Kuhn y Tucker 1951). Algunos modelos son muy realistas e incluyen múltiples restricciones en la definición de la tecnología, otros son más sencillos y utilizan una sola ecuación para representar la frontera eficiente, en tal caso la decisión óptima se satura (se cumple con igualdad,  $F_j(y_j) = 0$ ) y bajo condiciones de regularidad pueden usarse las condiciones necesarias de Lagrange para problemas de optimización sujeta a una restricción de igualdad. A veces, estas ecuaciones pueden resolverse analíticamente, pero en muchos casos se requiere utilizar algoritmos numéricos. Con tecnologías lineales, esto es un problema de programación lineal. Pero en muchos modelos de equilibrio, la frontera de la tecnología se representa utilizando tecnologías que proporcionan una solución analítica.

<sup>1</sup> En este caso, el problema de la empresa puede reformularse en dos etapas: primero computando la función de coste óptimo, (que proporciona el menor coste posible de producir  $y_{j2}$  cuando el precio de los factores es  $p_1$ ), es decir

$$C_j(y_{j2}, p_1) = \min_{y_{j1}} \{p_1 \cdot y_{j1} : y_{j2} \leq f_j(y_{j1}), y_{j1} \geq 0\}.$$

Segundo, si el precio del output es  $p_2$ , la maximización de beneficio de la empresa puede expresarse como

$$\max_{y_{j2} \geq 0} (p_2 \cdot y_{j2} - C_j(y_{j2}, p_1)).$$

La decisión que maximiza el beneficio varía con los precios, y se denota por  $y_j(p)$ . Bajo convexidad estricta, el *teorema del máximo* de Berge (1963) garantiza que si los precios son estrictamente positivos  $y_j(p)$  es una función continua. En este contexto, las coordenadas de  $y_j(p)$  son positivas para los outputs o bienes generados por la empresa (que pueden ser tanto productos y servicios finales usados por consumidores, como bienes intermedios utilizados por otras empresas). Cuando las coordenadas son negativas, indican inputs o factores de producción utilizados por la empresa en su proceso de producción. Son cero para los bienes que la empresa no utiliza ni produce.

En muchas tecnologías, un bien que se usa como input no puede ser usado como output, bajo tal *irreversibilidad* la tecnología puede expresarse como

$$\mathbb{Y}_j = \{(-y_{j,1}, y_{j,2}) : y_{j,2} \leq f_j(y_{j,1}), y_{j,1}, y_{j,2} \geq 0\}$$

que establece  $y_{j1}$  como input, e  $y_{j2}$  como output de forma predeterminada. Bajo irreversibilidad de la producción, la maximización de beneficios se expresa como

$$\max_{y_{j,1}, y_{j,2}} \{(p_2 \cdot y_{j,2} - p_1 \cdot y_{j,1}) : y_{j,2} \leq f_j(y_{j,1}), y_{j,1}, y_{j,2} \geq 0\}.$$

La producción eficiente se produce en la frontera (cuando  $y_{j2} = f_j(y_{j1})$ ), sustituyendo esta restricción, el problema se expresa equivalentemente como

$$\max_{y_{j,1} \geq 0} (p_2 \cdot f_j(y_{j,1}) - p_1 \cdot y_{j,1}),$$

La solución supone aumentar el uso de factores de producción hasta que se satisfaga la condición necesaria  $p_1 = p_2 \cdot \partial f_j(y_{j,1}) / \partial y_{j,1}$ , el valor marginal de añadir una unidad de un factor productivo iguala al precio  $p_1$  de dicha unidad. Este problema puede ser reescrito equivalentemente utilizando una función de costes<sup>1</sup>. Si se utiliza este tipo de notación, la demanda de factores productivos  $y_{j,1}(p)$  toma valores no negativos, y para calcular el equilibrio general habrá que cambiar el signo.

donde  $p_2$  es el precio del output. Bajo condiciones de regularidad, la decisión óptima satisface la condición necesaria

$$p_2 = \frac{\partial C_j(y_{j2}, p_1)}{\partial y_{j2}},$$

e invirtiendo esta función se obtiene la curva de oferta de la empresa  $y_{j2}(p)$ , y el argumento que minimiza el coste de producir dicha oferta es la demanda de factores  $y_{j1}(p)$ .

Sumando las curvas con las decisiones (ofertas de output y demandas de inputs) de las empresas, se obtiene la *oferta agregada* dada por

$$S(p) = \sum_{j=1}^J y_j(p).$$

Es posible que algunas ordenes de empresas se cancelen mutuamente (esto sucede en bienes intermedios, que fabrica una empresa para ser utilizado como un factor productivo por otros), o incluso que alguna coordenada de la oferta agregada sea cero. El valor neto  $S(p)$  son los bienes y servicios ofertados/ demandados a los consumidores, dependiendo del signo (por ejemplo, las empresas generalmente demandan trabajo, que es un tipo de servicio que ofertan los consumidores).

**B) los consumidores** planifican su cesta de consumo. Para sobrevivir, el consumidor debe consumir una cesta de bienes en su conjunto de supervivencia  $X_i \subset \mathbb{R}^n$ , que suele suponerse no vacío y convexo. El consumidor tiene un *preorden completo* de preferencias sobre sus posibles decisiones de consumo  $x_i$  en  $X_i$ , representado por  $\succsim_i$ ; en otras palabras, puede ordenar los planes de consumo, de forma que  $x_i \succsim_i x'_i$  si y solo si el consumidor  $i$  considera que  $x_i$  es al menos tan bueno como  $x'_i$  (que sea un *preorden completo* significa que cumple las propiedades de ser reflexiva, transitiva, y que puede comparar todos los posibles pares  $x_i, x'_i$  de consumo). Bajo condiciones de regularidad, puede probarse la existencia de una función continua  $U^i(x)$ , conocida como función de utilidad, que caracteriza las preferencias, es decir tal que  $x_i \succsim_i x'_i$  si, y solo si,  $U^i(x_i) \geq U^i(x'_i)$ . Debreu (1954) utiliza argumentos topológicos para demostrar la existencia de esta representación. Aquí se está utilizando la utilidad como un concepto ordinal, que no es interpretable en términos absolutos (no podemos sumar utilidades como si fuera una medición lineal, esto sería la noción de *utilidad cardinal*, descartada hace tiempo). La función de *utilidad ordinal* es útil, porque dada una función de utilidad del consumidor, encontrar el plan de consumo preferido se reduce a maximizar la función de utilidad.

En una economía de competitiva existe la propiedad privada. Los consumidores poseen los recursos existentes, y la distribución de los mismos está dada a priori. El consumidor  $i$  posee cierta riqueza o dotación inicial  $w_i$  en el interior de  $X_i$  (el consumidor al menos dispone de tiempo que puede ofertar para trabajar, y posiblemente ciertas cantidades de otros bienes), y simplificando un poco supondremos que el consumidor posee una fracción  $\theta_{i,j}$  de la empresa  $j$  lo que le genera acceso a esta fracción de sus beneficios (donde  $\sum_{i=1}^I \theta_{i,j} = 1$  para cada empresa  $j$ ). Dados los precios  $p$ , la riqueza del consumidor es

$$v_i = p \cdot w_i + \sum_{j=1}^J \theta_{i,j} (p \cdot y_j),$$

y por tanto consumidor tiene una restricción presupuestaria  $p \cdot x \leq v_i$ , y el problema del consumidor es maximizar la utilidad sujeto a dicha restricción, es decir:

$$\max_{x \in X_i} \{U^i(x) : p \cdot x \leq v_i\}.$$

Si la función de utilidad es monótona creciente, el caso más sencillo, la restricción presupuestaria se cumple con igualdad. La solución de este problema es un plan de consumo que es función del precio y la riqueza poseídos por el consumidor, podemos expresarlo como la función  $x_i(p, v_i)$ . Si la función de utilidad  $U^i(x_i)$  es estrictamente cuasiconcava<sup>1</sup> la demanda es una función, que se conoce como la *demanda Marshalliana* del consumidor. Si relajamos este requerimiento, la demanda podría ser una correspondencia. Supondremos por simplicidad que  $x_i(p, v_i)$  es una función, y que el *teorema del máximo* garantiza su continuidad. La diferencia  $(x_i(p, v_i) - w_i)$  se interpreta como la demanda/oferta de bienes del consumidor  $i$ , dependiendo del signo. Demanda bienes en las coordenadas para las que  $x_i(p, v_i) > w_i$  y oferta bienes para los que  $x_i(p, v_i) < w_i$ . El valor óptimo de la utilidad del consumidor se conoce como la *función indirecta de utilidad*  $V^i(p, v_i) = U^i(x_i(p, v_i))$ . El problema del consumidor también puede considerarse utilizando la teoría de dualidad para optimización convexa, considerando el mínimo gasto para alcanzar un cierto nivel de utilidad, este tipo de resultados suele tratarse en los textos de economía.

<sup>1</sup> Esto significa que  $X_i$  es un conjunto convexo, y para todo  $x_1, x_2 \in X_i$ , con  $x_1 \neq x_2$ , y todo  $a \in (0, 1)$ , se verifica que  $U^i(ax_1 + (1-a)x_2) > \min\{U^i(x_1), U^i(x_2)\}$ .



Dado que estamos interesados en el equilibrio, hay que tener en cuenta a todos los consumidores de la economía. La *demanda agregada Marshalliana* es la función

$$D^M(p) = \sum_{i=1}^I (x_i(p, v_i) - w_i),$$

que depende implícitamente de los niveles de riqueza  $v_i$ . Esta función de demanda neta de los consumidores es relevante para estudiar una pequeña industria, porque en este contexto los cambios de precios no afectan a la riqueza, por ello la *demanda Marshalliana* se utiliza en modelos de equilibrio parcial. Pero en contexto de *equilibrio general*, el cambio de los precios puede afectar al valor de la riqueza  $v_i$ , cuando esto se tiene en cuenta se considera la *demanda agregada Walrasiana*

$$D^W(p) = \sum_{i=1}^I \left( x_i \left( p, p \cdot w_i + \sum_{j=1}^J \theta_{i,j} (p \cdot y_j(p)) \right) - w_i \right),$$

interpretando como ofertas las coordenadas donde esta expresión es positiva (por ejemplo, los consumidores suelen ofertar horas de trabajo, materias primas, etc.). No solo depende del precio sino de la dotación  $w_i$  y los beneficios de las empresas. Nótese que  $v_i$  depende de  $p$  (aunque cuando sólo se considera un pequeño mercado, como en los modelos de equilibrio parcial, puede tomarse la riqueza  $v_i$  como constante). Simplificando un poco la notación, podemos escribir la *demanda agregada Walrasiana* como

$$D^W(p) = \sum_{i=1}^I (x_i(p, w_i, \{\theta_{i,j}\}) - w_i).$$

En algunos tipos de bienes (como el trabajo) el consumidor oferta, mientras que en bienes de consumo típicamente demanda para poder consumirlos. La continuidad de la demanda Walrasiana (así como las demandas de los consumidores individuales) requieren que  $w_i$  esté en el interior de  $\mathbb{X}_i$ , en caso contrario para algún nivel de precios podría darse alguna discontinuidad.

Conviene hacer notar que, por la estructura de la restricción presupuestaria, y los beneficios de la empresa, ni las decisiones de oferta ni las de demanda Walrasiana se modifican al re-escalar el vector de precios. Podemos dividir  $p$  por una constante, y las cantidades ofertadas o demandadas no cambian.

## EL EQUILIBRIO COMPETITIVO

Tanto en modelos de equilibrio parcial como general, en el precio  $p^*$  de equilibrio todos los planes son compatibles, lo que significa que bajo los precios de equilibrio la función global de exceso de demanda, definida como  $Z(p) = D(p) - S(p)$  es igual a cero. Es decir, se impone el vaciado del mercado.

El caso más relevante, que se utiliza cuando analizamos amplios sectores de una economía, son los modelos de *equilibrio general*, donde el precio de equilibrio resuelve el sistema de ecuaciones Walrasiano,

$$Z(p) = D^W(p) - S(p) = 0.$$

En el caso en que las decisiones de todos los consumidores satisfagan las respectivas restricciones presupuestarias con igualdad (este es el caso cuando las utilidades son monótonas crecientes, saturando estas restricciones), se satisface para cualquier precio  $p \geq 0$  que  $p \cdot Z(p) = 0$  (esto se obtiene al sumar todas las restricciones presupuestarias de los distintos consumidores) tal y como sugirió Leon Walras. Esto significa que, si todos los mercados menos uno están en equilibrio, este último también debe estar en equilibrio (es decir, podemos excluir una ecuación del sistema, que no tiene rango completo). Así mismo, sin pérdida de generalidad, podemos multiplicar el vector de precios por una constante sin que ello afecte a las decisiones de consumidores y empresas, por lo que podemos fijar el precio de un bien igual a 1 (de forma que todos los precios se expresen en unidades de dicho bien, al que se le llama bien *numeraire*), o podemos normalizar  $p$  para que sus coordenadas sumen uno. En cualquier caso, el sistema Walrasiano de equilibrio se resuelve en el subespacio de dimensión  $n - 1$ . Este es el modelo base para describir las economías competitivas. La resolución práctica de  $Z(p) = 0$ , generalmente requiere el uso de métodos de computación numérica. Una formulación algo más general del equilibrio Walrasiano puede definirse como la solución  $p^*$  del sistema de desigualdades  $Z(p) \leq 0$ ,  $p \geq 0$ ,  $p \cdot Z(p) = 0$ , donde se permite que algunos bienes tengan precio cero.

Arrow y Debreu (1954) y Debreu (1959) formulan el modelo Walrasiano usando axiomas formales, y derivan teoremas de existencia de equilibrio. El *modelo Arrow-Debreu* se convirtió rápidamente en un

paradigma de rigor en el análisis económico. El modelo competitivo no entra en detalle respecto al proceso que lleva a la economía al precio de equilibrio, considerando implícitamente que se alcanza debido a la mano invisible del mercado. Diversos experimentos muestran como los precios a los que las personas intercambian, tienden a ajustarse hasta que se igualan ofertas y demandas, si bien el ajuste puede llevar algún tiempo. Esta es la razón por la que las economías reales pueden tener algunos sectores están en desequilibrio, esto es más probable cuando existen restricciones institucionales (por ejemplo, restricciones a los precios). No obstante, existen formalizaciones de la idea de un subastador artificial que mueve los precios hacia el equilibrio, usando un sistema dinámico convergente en un proceso descrito como *tâtonnement* (tanteo).

Es posible que en el precio de equilibrio  $p^*$  las empresas obtengan beneficios, en el sentido de que  $p^* \cdot y_j(p^*) > 0$ . A este tipo de beneficios se le denomina en ocasiones como beneficios extraordinarios (para enfatizar que estos beneficios son diferentes del pago de factores productivos de capital, como maquinaria o instalaciones). Cuando el número de empresas de la economía es muy elevado, y pueden entrar en todos los mercados que presenten este tipo de beneficios, la

oferta agregada tiende a desplazarse al alza y los precios de equilibrio tienden a reducirse, disminuyendo los beneficios extraordinarios (que en el caso límite tenderían a cero), pero esto es probablemente poco realista y el modelo de equilibrio no lo requiere. No obstante, es razonable esperar que no existan grandes diferencias entre distintos mercados (a no ser que existan barreras legales o tecnológicas que impidan a las restantes empresas competir en los que ofrecen más rentabilidad).

Cuando se estudia un pequeño sector de la economía, el cambio en los precios no afecta apenas al valor de la riqueza de los consumidores (los valores  $v_i$  pueden interpretarse como constantes), y por tanto podemos usar un modelo de *equilibrio parcial*, resolviendo el sistema Marshalliano

$$D^M(p) = S(p).$$

Tal y como se ha indicado en la introducción, a menudo se representa gráficamente este sistema mediante el cruce de una curva de demanda Marshalliana y una de oferta, como si fueran unas tijeras (Figura 4). En este gráfico, el argumento se dibuja tradicionalmente en el eje vertical.

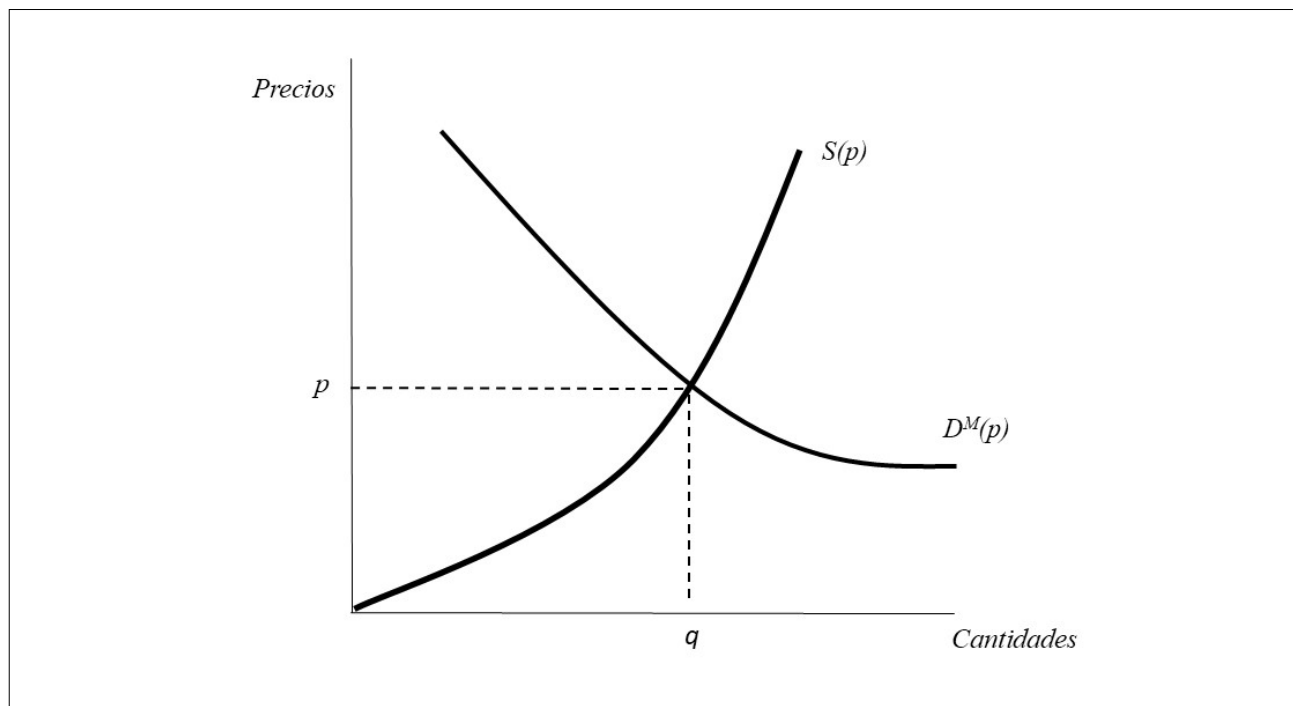


Figura 4. Equilibrio parcial como intersección de la curva de oferta y de demanda.



Aunque se ha presentado el modelo típico de una economía competitiva, existen múltiples aspectos complementarios que pueden considerarse. Por ejemplo, tanto funciones de utilidad como tecnologías pueden ser influidas por factores externos observables  $z$ , y también por perturbaciones aleatorias exógenas  $u$ , tal y como se discutió en la sección previa, por lo que el modelo puede ser usado para estudiar estática comparativa y simular el impacto de shocks exógenos. Además, utilidades y tecnologías dependen de parámetros  $\theta^0$  cuyo valor se estima ajustando el modelo a los datos existentes, y también se puede estudiar la sensibilidad del equilibrio con respecto a cambios en los parámetros usando a la estática comparativa, o mediante simulaciones numéricas.

Como ya se ha mencionado, en el modelo competitivo se consideran economías con un gran número de consumidores y empresas que toman decisiones racionales asumiendo su propia incapacidad para influir directamente en el precio. No obstante, en muchas situaciones el número de agentes es limitado, lo que les confiere poder para tratar de influir en el mismo. Por ejemplo, en mercados oligopolistas, donde el comportamiento estratégico de las empresas puede ser muy diferente. La idea ya había sido sugerida por Cournot. La *teoría de los juegos* facilitó el desarrollo de la *economía industrial* donde las empresas adoptan decisiones estratégicas.

Una ventaja importante del equilibrio competitivo es su descentralización, son las acciones de los agentes las que llevan la economía al equilibrio (el vaciado de mercados), sin necesidad de un organismo centralizado que gestione toda la información desde/hacia los agentes económicos y planifique las asignaciones.

Otra propiedad deseable para una asignación económica es la denominada *eficiencia en el sentido de Pareto* (es decir, que no puede alcanzarse una asignación mejor para alguien sin que otro consumidor sea perjudicado; o en otras palabras que no existe una asignación unánimemente preferible). Existen dos *teoremas de bienestar* que se utilizan para justificar la deseabilidad de los mercados competitivos: el primero establece que bajo condiciones de regularidad, todo equilibrio competitivo es Pareto-eficiente. El segundo, que si se redistribuye la riqueza adecuadamente, cualquier asignación Pareto-eficiente es alcanzable como el equilibrio del mercado. La demostración puede consultarse, por ejemplo, en Mas-Colell, Whinston y Green (1995). La eficiencia del equilibrio falla en

economías donde unas pocas empresas o consumidores tienen *poder de mercado*, o cuando existen *no convexidades*. También falla cuando existen *externalidades*, es decir las acciones de un agente económico afectan directamente las preferencias o la tecnología de otro. No obstante, la eficiencia Paretiana es compatible con una fuerte desigualdad. Pareto introduce la distribución de su nombre para estudiar la distribución de la riqueza.

Los modelos que he descrito previamente consideran cada tipo de producto o servicio de forma individual; es decir, cada bien se estudia dentro de un mercado con su propia oferta y demanda. Sin embargo, a veces interesa construir modelos que analizan el comportamiento global de una economía de forma sintética. Estos modelos suelen considerar productos artificiales (índices agregados de bienes) y precios artificiales (índices agregados de precios) de la economía, y se modeliza el equilibrio de este tipo de variables artificiales, a partir del comportamiento de agentes genéricos. La *macroeconomía* es la rama de la economía basada en modelos con productos y precios agregados que tratan de explicar los patrones a gran escala de la actividad económica; surge a partir de los modelos informales de Keynes (1936). Para una introducción a la *macroeconomía* moderna véase Blanchard y Fischer (1989). En contraste, el término *microeconomía* se utiliza para los modelos desagregados. Para una revisión general de los modelos de microeconomía contemporánea, véase Varian (1992), Kreps (2013, 2023), Jehle and Reny (2011), y especialmente Mas-Colell, Whinston y Green (1995).

## INCOMPLETITUD DE MERCADOS

Un reto relevante es que, en la realidad, a menudo no existe mercados donde puedan intercambiarse todo tipo de bienes posibles. Distintos grupos de consumidores y empresas pueden operar en países distintos con sus propios mercados desconectados, tampoco se intercambian ofertas-demandas entre todos los escenarios posibles de la naturaleza, ni para todos los periodos. En general, es posible partir la economía en submercados independientes no conectados. Cuando esto sucede decimos que los mercados están incompletos. No obstante, es posible que en cada mercado exista algún bien especial, un activo financiero, que puede utilizarse para intercambiar valor dentro de

dicho mercado. Si hay un mercado de activos financieros, entonces el mercado de bienes en su conjunto podría ser completado. La clave es que el sistema financiero sea lo suficientemente rico para que se puedan alcanzar los mismos intercambios que suceden en un mercado donde cualquier intercambio de bienes es posible a priori.

A continuación, se proporciona un ejemplo sencillo. Consideremos una economía arcaica sin empresas, y supongamos que la economía está partida en  $R$  mercados (por ejemplo, países), así que los consumidores pueden comprar bienes en cada uno de ellos, pero de forma separada, resolviendo el problema de optimización

$$\begin{aligned} & \max_x U^i(x_1, \dots, x_R) \\ & \text{sujeto a } p_r \cdot (x_r - w_r^i) = 0, \quad r = 1, \dots, R. \end{aligned}$$

El vaciado de mercado,  $Z_r(p_r) = \sum_{i=1}^I (x_r(p_r) - w_r^i) = 0$ , determina el precio en cada mercado. Pero la asignación suele ser Pareto-ineficiente; es posible que en unos mercados  $r$  un producto sea poco demandado respecto a la oferta y su precio de equilibrio sea bajo, mientras que en otra nación  $r'$  haya una gran escasez de ese mismo producto y que tenga un alto precio (y que haya consumidores insatisfechos que no pueden comprarlo). Por contra, si hubiera un mercado común donde todo pudiera intercambiarse, algunos consumidores podrían mejorar sin que el resto estuviera peor. El origen de esta ineficiencia es la *incompletitud* de mercados.

Introduzcamos ahora para cada país  $r$  un activo financiero dinero  $\mu_r$ , y supongamos que se crea también un mercado financiero adicional donde se intercambian estas monedas (divisas) a precio  $q_r$ , de forma que el tipo de cambio entre dos países  $r, r'$  está dado por el ratio  $q_r/q_{r'}$ . Supongamos que para cada país  $r = 1, \dots, R$ , el gobierno crea la oferta de dinero a la que denotamos por  $M_r$  respectivamente. Ahora, el consumidor resuelve

$$\begin{aligned} & \max_{x, \mu} U^i(x_1, \dots, x_R) \\ & \text{sujeto a } p_r \cdot (x_r - w_r^i) = \mu_r^i, \quad r = 1, \dots, R \\ & \quad \quad \quad \sum_{r=1}^R q_r \mu_r^i = 0. \end{aligned}$$

La ecuación inferior indica que el consumidor no crea valor de la nada a través de operaciones cambiarias, pero puede intercambiar las distintas divisas. Gracias a que puede comprar moneda en un país y cambiarla por moneda de otro en el mercado financiero, ahora puede trasladar valor de una nación a otra. En este contexto, tenemos una

demanda de bienes y de dinero, y los precios de equilibrio  $p_r, q_r$  de todos los países se obtienen cuando  $\sum_{i=1}^I (x_r(p, q) - w_r^i) = 0$ , y  $\sum_{i=1}^I (\mu_r^i(p, q) - M_r) = 0$  para cada  $r$ . Obsérvese que los gobiernos pueden intervenir en la economía cambiando la oferta monetaria, lo que a su vez influye en los precios, generando un incremento o reducción acorde al sentido de la intervención. Esto, en teoría no afecta al consumo y producción de equilibrio (ya que los precios relativos no varían), pero en la práctica los consumidores pueden verse afectados por diversos sesgos cognitivos, por lo que las intervenciones monetarias pueden tener efectos a corto plazo conforme la economía se ajusta al equilibrio, pero en el largo plazo sin embargo la intervención sería inefectiva en términos reales (a no ser que generase cambios de un equilibrio local a otro). Las intervenciones monetarias que tratan de influir en la economía en el corto plazo manipulando la oferta monetaria y los mercados financieros conforman la *política monetaria* de una economía, y las implementan principalmente los bancos centrales.

El modelo competitivo que se ha introducido en esta sección es esencialmente estático, (aunque los bienes considerados en los vectores  $x, y$  pueden incluir distintos periodos). Pero en muchos casos, el enfoque del modelo se centra en un periodo concreto. Esto tiene sentido cuando nos interesa estudiar decisiones a muy corto plazo, pero también cuando el equilibrio a largo plazo es un *steady state* (no cambia). Pero este no es el caso habitual en la mayoría de las economías. Las sendas de equilibrio suelen fluctuar. Por ejemplo, los precios de uno o varios bienes pueden aumentar/bajar de forma sostenida en el tiempo (*inflación/deflación*, respectivamente), y la producción y consumo de la senda equilibrio también pueden cambiar. En tal caso, puede interesar el análisis de la tendencia secular de estas variables (que se estudia con modelos de *crecimiento económico*, y también estudiar la existencia de oscilaciones cíclicas entorno a la tendencia (lo que se conoce como ciclos de negocio o *business cycles*). También es relevante estudiar las posibles perturbaciones aleatorias que impacten en la economía. En contexto dinámico, los agentes pueden desarrollar expectativas sobre aspectos inciertos, y actuar en consecuencia. Por ejemplo, aunque las manchas solares no incidan directamente en la tecnología (al menos no en la mayor parte de ellas), si los agentes económicos creen que incidirán, su propio comportamiento puede dar lugar a una profecía autocumplida. En otras palabras, las expectativas juegan un papel relevante en los procesos dinámicos bajo incertidumbre.



En muchos modelos las variables de decisión son procesos estocásticos. Esencialmente, basta considerar que  $x, y$  toman valores en un espacio vectorial de dimensión infinita, y considerar los precios como operadores lineales  $\langle p, x \rangle$ . En este tipo de espacios, la herramienta matemática se vuelve más sofisticada, véase por ejemplo Zame (1987), Mas-Colell y Zame (1991). Dependiendo del tipo de modelo dinámico (determinista o estocástico, tiempo continuo o tiempo discreto), pueden utilizarse diferentes herramientas matemáticas para resolver los problemas de la empresa o el consumidor (como el *cálculo de variaciones*, el *control óptimo*, o la *programación dinámica*). Esto hace que los modelos utilicen conceptos habituales en física e ingeniería, como Hamiltonianos, ecuaciones de Hamilton-Jacobi-Bellman, ecuaciones de Euler, etc.

En la sección previa se introdujo la incompletitud de mercados en el contexto de distintos países. La incompletitud de mercados es habitual también en contextos dinámicos y/o de incertidumbre. Introduciendo activos financieros suficientemente variados y complejos, es posible completar los mercados facilitando la tarea de transmitir valor en el tiempo (esencial para el ahorro y la inversión) y redistribuir riesgos (como en los mercados de seguros). La *economía financiera* se centra en el análisis de este tipo de mercados. El matemático Louis Bachelier (1900) introdujo el movimiento Browniano para estudiar la especulación. Black and Scholes (1973) predicen el precio de derivados financieros con la ecuación del calor. Los aspectos financieros también afectan al gasto público. El estado puede endeudarse unos periodos (necesita financiación), y ahorrar en otros. La reducción de impuestos y el aumento de gasto público (generando deficit en el estado) se utiliza para incentivar la actividad económica cuando el ciclo está en una fase recesiva, por el contrario, el superávit (asociado a mayores impuestos y menos gasto) suele darse cuando la economía está en una fase expansiva que genera tensiones inflacionarias. La deuda pública puede crecer en ciertos periodos siempre y cuando no lo haga a un ritmo más elevado del crecimiento de la economía a la hora de facilitar el pago futuro. Este tipo de decisiones forman parte de lo que se conoce como *política fiscal*.

Otro aspecto relevante en economías dinámicas es el cambio en la estructura de la población. Un ejemplo son

los *modelos de generaciones solapadas* (Balasko y Shell 1980, 1981, Geanakoplos 1989, Galor 1992).

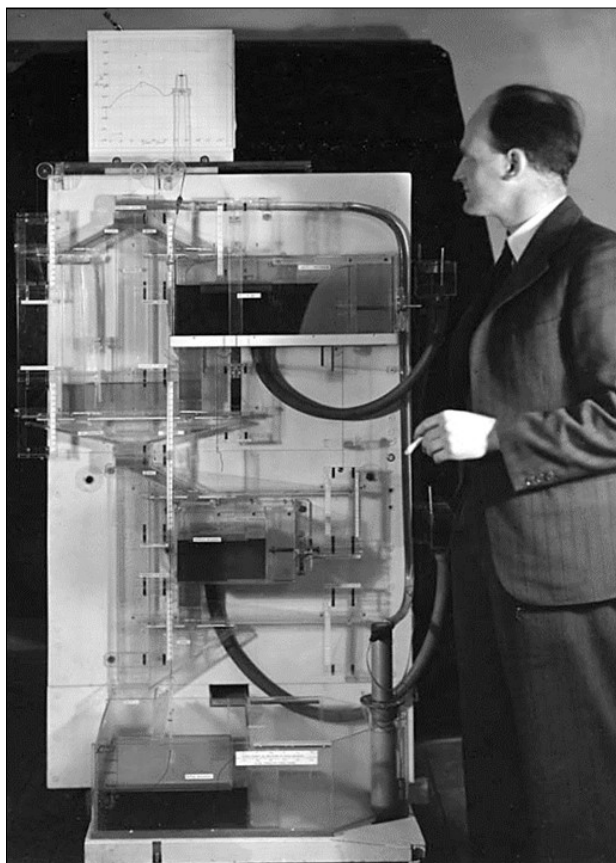
## OTRAS APORTACIONES DE LAS CIENCIAS

En este trabajo se ha examinado la influencia histórica de las ciencias exactas y naturales en los modelos de economía. Sin embargo, este flujo todavía se mantiene. En la actualidad, algunos físicos se interesan por la economía y exploran modelos que examinan aspectos económicos. Por ejemplo, la *econofísica* utiliza teoría de sistemas complejos para estudiar aspectos económicos evitando el concepto de equilibrio (para una introducción véase, por ejemplo, Sinha y otros 2010), y la *termoeconomía* usa la entropía y las leyes de termodinámica para estudiar procesos económicos (véase Georgescu-Roegen, 1986; Stanislaw y Salamon. 1990). Estas escuelas tienden a adoptar postulados bastante alejados de la teoría económica estándar. Existen otras influencias de distintas ciencias naturales, como sugiere Hirschleifer (1977). Existen modelos evolutivos que tratan de incorporar la revolución Darwinista (Veblen 1898, Nelson y Winter 1982, Bowles 2009). También hay grupos que utilizan técnicas de neuroimagen (Rustichini, 2009). Algunos modelos económicos incluyen aspectos ecológicos, véase Georgescu-Roegen (1971), Nordhaus y Tobin (1972), Nordhaus (1992, 1994). Tasoff y otros (2015) interpretan intercambios microbiales usando economía. Franklin (1983) discute algunos problemas de economía bajo el punto de vista de un matemático.

La ingeniería también ha establecido algunas conexiones interesantes con la economía. El economista neozelandés A. William H. Phillips diseñó un sistema hidráulico para representar y calcular el equilibrio del sistema económico del Reino Unido en 1949. El nombre formal de la también conocida como máquina de Phillips era *Monetary National Income Analogue Computer* (MONIAC). Se construyeron diversos prototipos del MONIAC, y todavía se conservan algunos en diversos museos e instituciones (como la *London School of Economics*, cuyo ejemplar se exhibe en el museo de la ciencia en Londres). La Figura 5 muestra al autor con su máquina<sup>1</sup>. La microeconomía también ha influido

<sup>1</sup>Véase una demostración en  
<https://www.youtube.com/watch?v=gkNaZJmii28>

notablemente en la ingeniería industrial. Cabe señalar el temprano trabajo de Claude-Louis Marie Henri Navier en la *Échole de Ponts et Chaussées* que utilizó de forma temprana el análisis coste-beneficio de obra pública, cuyo trabajo fue continuado por Joseph Minard (véase Ekelund Jr y Hébert, 1978).



**Figura 5. Profesor Phillips con su máquina de cómputo MONIAC. (Fuente: LSE Library).**

En todas las ramas de la ciencia, la obtención de datos (mediante sistemas de medición precisos y la observación de nuevas facetas de la realidad) es esencial para el avance del conocimiento, especialmente cuando los datos contradicen algunas predicciones de los modelos existentes. Esto estimula a los investigadores para enriquecer el modelo, volviéndolo más realista y robusto. Pero, aunque lo requieran los datos, el diseño de nuevos modelos no siempre es sencillo. A menudo se necesita un enfoque interdisciplinar. La incorporación de nuevas perspectivas es una forma magnífica de enriquecer el conocimiento. Al final, todas las ciencias son una, y todas ellas tie-

nen un fin común: entender mejor el universo que nos ocupa en sus múltiples y diversas escalas, respondiendo con ello tanto a la curiosidad de la humanidad como a sus necesidades, y esperanzadoramente mejorar el bienestar de todos.

## CONFLICTO DE INTERESES

El autor/a de este artículo declara no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Angrist, J. D., & Pischke, J. S. (2009). Mostly harmless econometrics: An empiricist's companion. Princeton University Press.
2. Angrist, J. D., & Pischke, J. S. (2010). The credibility revolution in empirical economics: How better research design is taking the con out of econometrics. *Journal of economic perspectives*, 24(2), 3-30.
3. Angrist, J. D., & Pischke, J. S. (2015). *Mastering Metrics: The Path from Cause to Effect*. Princeton University Press.
4. Arrow, K. J.; & G. Debreu (1954). Existence of an equilibrium for a competitive economy. *Econometrica*, 22 (3), 265-290.
5. Bachelier, L. (1900). *Théorie de la spéculation*. *Annales scientifiques de l'École normale supérieure*, 17, 21-86.
6. Banerjee, A. V., & Duflo, E. (eds.) (2017). *Handbook of field experiments*, vol 1 and 2. North-Holland Publishing Company.
7. Balasko, Y., and K. Shell (1980). The Overlapping-Generations Model, I: The Case of Pure Exchange Without Money. *Journal of Economic Theory*, 23, 281-306.
8. Balasko, Y., and Shell, K. (1981). The Overlapping-Generations Model. II. The Case of Pure Exchange with Money. *Journal of Economic Theory*, 24, 112-142.



9. Barbolla, R., & Corchón, L. C. (1989). An elementary proof of the existence of a competitive equilibrium in a special case. *The Quarterly Journal of Economics*, 104(2), 385-389.
10. Berge, C. (1963). *Topological spaces, including a treatment of multi-valued functions, vector spaces and convexity*, London: Oliver and Boyd. (Traducción al inglés de: *Espaces topologiques: fonctions multivoques*, Paris, Dunod, 1959).
11. Bertrand, J. L. F. (1883a). *Théorie des Richesses: revue de Théories mathématiques de la richesse sociale par Léon Walras*. *Journal des Savants*.
12. Bertrand, J. L. F. (1883b). *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses par Augustin Cournot*. *Journal des Savants*.
13. Black, F.; M. Scholes (1973). The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *Journal of Political Economy*, 81(3), 637-654.
14. Blanchard, O. J., & S. Fischer (1989). *Lectures on macroeconomics*. Cambridge, MA: The MIT Press.
15. Bowles, S. (2009). *Microeconomics: behavior, institutions, and evolution*. Princeton NJ: Princeton University Press.
16. Cournot, A.-A. (1838). *Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses*. Paris: L. Hachette.
17. Debreu, G. (1954). Representation of a Preference Ordering by a Numerical Function. (Thrall, M., Davis, R.C. and Coombs, C.H., Eds.), *Decision Processes*, New York: John Wiley and Sons; pp. 159-165.
18. Debreu, G. (1959). *Theory of value: An axiomatic analysis of economic equilibrium*. N 17, Cowles Foundation Monographs. New Haven: Yale University Press.
19. Dütte, T., and Weintraub, E. R. (2016). Losing Equilibrium: On the Existence of Abraham Wald's Fixed-Point Proof of 1935. *History of Political Economy*, 48 (4), 635-655.
20. Dupuit, J. (1844). On the measurement of the utility of public works. *International Economic Papers*, 2 (1952), 83-110.
21. Edgeworth, F. Y. (1881), *Mathematical psychics: An essay on the application of mathematics to the moral sciences*, London: C. Kegan Paul and Co.
22. Ekelund Jr, R. B., & Hébert, R. F. (1978). French engineers, welfare economics, and public finance in the nineteenth century. *History of Political Economy*, 10(4), 636-668.
23. Esteban-Bravo, M.; and J. M. Vidal-Sanz (2021). *Marketing Research Methods: Quantitative and Qualitative Approaches*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
24. Ezekiel, M. (1938). The cobweb theorem. *The Quarterly Journal of Economics*, 52(2), 255-280.
25. Felipe, J. and Fisher, F. M. (2003). Aggregation in Production Functions: What Applied Economists Should Know. *Metroeconomica* 54, (2 & 3), 208-262.
26. Fisher, I. (1906). *The Nature of Capital and Income*, New York: Macmillan.
27. Fisher, I. (1907). *The Rate of Interest: Its nature, determination and relation to economic phenomena*. New York: Macmillan.
28. Fisher, I. (1930). *The Theory of Interest: As determined by impatience to spend income and opportunity to invest it*. New York: The Macmillan Company; (1954 reprint, New York: Kelley and Millman).
29. Fisher, R. A. (1925a). *Statistical Methods for Research Workers*. Edinburgh: Oliver and Boyd
30. Fisher, R. A. (1925b). Theory of statistical estimation. *Proc. Cambridge Philosophical Society*, 22, 700-725.
31. Fisher, R. A. (1926). The Arrangement of Field Experiments. *Journal of the Ministry of Agriculture*, 33, 503-513.
32. Fisher, R. A. (1935). *The Design of Experiments*. Edinburgh: Oliver and Boyd, (9th ed. in Macmillan, 1971).
33. Franklin, J. (1983). Mathematical methods of economics. *The American Mathematical Monthly*, 90 (4), 229-244.



34. Galor, O. (1992). A Two-Sector Overlapping-Generations Model: A Global Characterization of the Dynamical System. *Econometrica*, 60 (6), 1351-1386.
35. Geanakoplos, J. (1989). Overlapping generations model of general equilibrium. (Eatwell, J.; M. Milgate, and P. Newman, eds.) *General Equilibrium*. London: Palgrave Macmillan (pp. 205-233).
36. Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
37. Georgescu-Roegen, N. (1986). The entropy law and the economic process in retrospect. *Eastern Economic Journal*, 12(1), 3-25.
38. Greenberg, J. (1977). An elementary proof of the existence of a competitive equilibrium with weak gross substitutes. *The Quarterly Journal of Economics*, 91(3), 513-516.
39. Hald, A. (1999). On the History of Maximum Likelihood in Relation to Inverse Probability and Least Squares. *Statistical Science*, Vol. 14(2), 214-222.
40. Hicks, J. R. (1939, 2nd ed. 1946). *Value and Capital: An Inquiry into Some Fundamental Principles of Economic Theory*. Oxford: Clarendon Press.
41. Jehle, G. A. and Reny, P. J. (2011), *Advanced Microeconomic Theory* (Third Edition), Prentice Hall.
42. Jenkin, H. C. F. (1870). *The Graphical Representation of the Laws of Supply and Demand, and their Application to Labour*. (Sir. Alexander Grant, ed.) *Recess Studies*. Edinburgh: Edmonton and Doublas (Ch. IV, pp. 151-185).
43. Judd, K. L. (1998). *Numerical methods in economics*. Cambridge, MA: The MIT Press.
44. Kuhn, H. W. & Tucker, A. W. (1951). *Proceedings of 2nd Berkeley Symposium, Nonlinear programming*. Berkeley: University of California Press.
45. Karush, W. (1939). *Minima of Functions of Several Variables with Inequalities as Side Constraints*. M.Sc. Dissertation, Dept. of Mathematics, University of Chicago.
46. Keynes, J. M. (1936). *The General Theory of Employment, Interest, and Money*. London: Mcmillan.
47. Kreps, D. M. (2013). *Microeconomic foundations I: choice and competitive markets*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
48. Kreps, D. M. (2023). *Microeconomic foundations II: Imperfect competition, information, and strategic interaction*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
49. Kusumoto, S. I. (1976). Extensions of the Le Chatelier-Samuelson principle and their Application to Analytical Economics—constraints and economic analysis. *Econometrica*, 44(3), 509-535.
50. Leontief, W. W. (1936). Quantitative input and output relations in the economic system of the United States. *The Review of Economics and Statistics*, 18 (3), 105-125.
51. Marshall, Alfred (1890), *Principles of Economics*, Macmillan.
52. Mas-Colell, A.; Whinston, M. D.; & Green, J. R. (1995), *Microeconomic theory*, New York: Oxford university press.
53. Mas-Colell, A., & Zame, W. R. (1991). Equilibrium theory in infinite dimensional spaces. *Handbook of mathematical economics*, Vol. 4, North-Holland. (pp 1835-18984).
54. Menger, Carl (1871), *Grundsätze der Volkswirtschaftslehre* (Principles of Economics), Austria, Braumüller.
55. Milgrom, Paul (2006). Multipliers and the LeChatelier principle. (Michael Szenberg, Lall Ramrattan, and Aron A. Gottesman; eds) *Samuelsonian Economics and the twenty-first Century*, Oxford University Press, (pp. 303-10).
56. Nash, J. (1951). Non-cooperative games. *Annals of mathematics*, 54(2), 286-295.
57. Nelson, R.; & Winter, S. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University.
58. Neyman, J. (1951). Review of Contributions to Mathematical Statistics by R. A. Fisher. *Scientific Monthly*, 72, 406-408.
59. Neyman, J. (1961). Discussion of Rao (1961). *Bulletin of the International Statistical Institute*, 38(1), 193-200.



60. Nordhaus, W. D. (1992). The "dice" model: Background and structure of a dynamic integrated climate-economy model of the economics of global warming. Discussion Paper No. 1009; Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University.
61. Nordhaus, W. D. (1994). Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change. Cambridge, MA.: MIT Press.
62. Nordhaus, W. D. & Tobin, J. (1972), Economic Research: Retrospect and Prospect, Volume 5, Economic Growth. NBER Books.
63. Pareto, V. F. (1896-1897). Cours d'économie politique professé à l'Université de Lausanne, tome premier et tome second. Lausanne: F. Rouge.
64. Pareto, V. F. (1906). Manuel d'économie politique. Milano: Societa' Editrice Libreria; (French edition; Manuel d'économie politique. Paris: Giard et Briere, 1909).
65. Pratt, J. W. (1976). F. Y. Edgeworth and R. A. Fisher on the Efficiency of Maximum Likelihood Estimation. Annals of Statistics, Vol. 4 (3), 501-514.
66. Redman, D. A. (1997). The Rise of Political Economy as a Science: Methodology and the Classical Economists, Cambridge, MA: MIT Press.
67. Rustichini A (2009). Neuroeconomics: What have we found, and what should we search for? Current Opinion in Neurobiology, 19 (6), 672-677.
68. Samuelson, P. A. (1941). The stability of equilibrium: comparative statics and dynamics. Econometrica, 9(2), 97-120.
69. Samuelson, P. A. (1947). Foundations of Economic Analysis. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
70. Samuelson, P. A. (1960). An extension of the LeChatelier principle. Econometrica, 28(2), 368-379.
71. Sinha, S.; Chatterjee, A.; Chakraborti, A.; & Chakrabarti, B. K. (2010), Econophysics: an introduction. New York: John Wiley & Sons.
72. Smith, V. L. (1962). An experimental study of competitive market behavior. Journal of Political Economy, 70(2), 111-137.
73. Smith, V. L. (1989). Theory, experiment and economics. Journal of Economic Perspectives, 3(1), 151-169.
74. Stanislaw, S. & Salamon, P. (eds.) (1990). Finite-Time Thermodynamics and Thermoeconomics. Taylor & Francis.
75. Tasoff, J., Mee, M. T., & Wang, H. H. (2015). An economic framework of microbial trade. PloS one, 10(7), e0132907.
76. Varian, H. R. (1992). Microeconomic analysis (third edition). WW Norton and Company.
77. Veblen, T. (1898). Why is economics not an evolutionary science? The Quarterly Journal of Economics, 12(4), 373-397.
78. Veblen, T. (1900). The preconceptions of economic science. The Quarterly Journal of Economics, 14 (2), 240-269.
79. von Neumann, J. (1937). A Model of General Economic Equilibrium. (K. Menger, editor), Ergebnisse eines mathematischen Kolloquiums, 1935-36. 1945 Translation, Review of Economic Studies, 13 (1),1-9.
80. von Neumann, J.; & Morgenstern, O. (1947), Theory of games and economic behavior (2nd ed), Princeton, N. J., Princeton University Press, (first edition from 1944).
81. Wald, A. (1951). On some systems of equations of mathematical economics. Econometrica, 19 (4) 368-403.
82. Walras, L. (1874). Éléments d'économie politique pure, ou théorie de la richesse sociale, Paris et Lausanne; (definitive edition 1926, English translation by Jaffé, W., 1954. Elements of Pure Economics, or, the theory of Social Choice, Allen and Unwin).
83. Zame, W. R. (1987). Competitive equilibria in production economies with an infinite-dimensional commodity space. Econometrica, 55(5),1075-1108.

---

**Si desea citar nuestro artículo:**

Vidal-Sanz JM. Sobre Economía y las Ciencias Matemáticas, Físicas y Naturales.  
RACSG.2025;113(01):22-39. [rac.2025.113.1.org02](http://rac.2025.113.1.org02)

**ORIGINAL**

# UNA PERSPECTIVA TEMPORAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO

## A TIME PERSPECTIVE OF CLIMATE CHANGE

**Laia Alegret Badiola<sup>1</sup>**

1. Académica de número, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

### RESUMEN

Desde que comenzó el periodo industrial, las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de las actividades humanas han causado un cambio climático a gran escala. Sus efectos se han documentado con medidas directas de los parámetros que caracterizan el clima, como la temperatura, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, el viento o las precipitaciones. No obstante, el público recibe a menudo información errónea que arroja dudas sobre la realidad del cambio global causado por el hombre. Con el fin de desacreditar el “escepticismo” climático, es necesario evaluar el cambio climático en un contexto temporal amplio, pero las medidas instrumentales únicamente proporcionan series históricas de datos. Para periodos de tiempo de miles de años, las burbujas de aire atrapadas en el hielo ofrecen una medida directa de la concentración dióxido de carbono en la atmósfera, y la evolución del clima a lo largo de millones de años se infiere a partir de indicadores indirectos que se obtienen analizando las rocas sedimentarias y los fósiles. Los registros de los últimos 66 millones de años ponen de manifiesto la excepcionalidad del actual cambio climático, confirman la íntima relación que existe entre la temperatura y la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, y alertan sobre posibles puntos de no retorno. El registro geológico también revela la existencia de rápidos eventos de calentamiento superpuestos a las tendencias graduales del clima, que se estudian como análogos del actual cambio climático y permiten mejorar los modelos predictivos.

**Palabras clave:** Cambio global; Gases invernadero; Paleoclimatología; Registro geológico; Fósiles.

### ABSTRACT

Since the beginning of the industrial era, greenhouse gases emissions derived from human activities have caused large-scale climate change. Its effects are documented by direct measurements of parameters that characterize the climate, such as temperature, atmospheric carbon dioxide concentration, winds, or precipitation. However, the public often receives erroneous information that poses doubts about the man-caused global change. In order to debunk climate “scepticism,” climate change needs to be assessed over a long time frame, but instrumental measurements only provide historical data series. For time periods of thousands of years, air bubbles trapped in ice provide a direct measure of atmospheric carbon dioxide concentration, and climate evolution over millions of years is inferred from indirect indicators obtained by analyzing sedimentary rocks and fossils.

Records from the past 66 million years demonstrate the exceptional nature of the current climate change, they support the close relationship between temperature and atmospheric carbon dioxide concentration, and warn about possible non-returning points. The geological record also reveals the existence of rapid warming events superimposed on gradual climate trends, which are studied as analogues of current climate change and allow for improved predictive models.

**Keywords:** Global change; Greenhouse gases; Palaeoclimatology; Geological record; Fossils.

Correspondencia

Laia Alegret Badiola

Departamento de Ciencias de la Tierra (Facultad de Ciencias) e Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón, Universidad de Zaragoza, Zaragoza.

E-mail: laia@unizar.es | Web: <https://personal.unizar.es/alegret/>



## INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una de las muchas transformaciones a gran escala que se están produciendo en nuestro planeta desde el siglo XIX como consecuencia de las actividades humanas. Constituye uno de los grandes desafíos de nuestro tiempo, y ha pasado a ocupar un primer plano en foros científicos, políticos, económicos y sociales a nivel mundial. Las consecuencias del cambio climático son evidentes y los datos sobre su impacto a día de hoy son cada vez más contundentes, pero la circulación de bulos e información errónea alimentan el “escepticismo” climático.

En los últimos cuatro años se han batido récords de temperaturas en todos los continentes. Los fenómenos meteorológicos extremos como las lluvias torrenciales o las sequías, los cambios en las pautas meteorológicas, el aumento de la temperatura global, la disminución del hielo y el ascenso del nivel del mar, afectan a la salud global, aumentan las muertes por calor y por catástrofes, pandemias y enfermedades, amenazan la producción de alimentos, provocan migraciones de muchas especies, incluida la nuestra, y ya han causado ingentes pérdidas económicas (IPCC, 2023; Romanello et al., 2023).

El concepto de “cambio global” se refiere a este amplio conjunto de cambios y transformaciones, y para entender su excepcionalidad y plantear soluciones o mecanismos de mitigación y adaptación, es fundamental analizar sus causas y ponerlo en contexto. Un contexto temporal amplio, que permita compararlo no sólo con el clima que hemos experimentado a lo largo de nuestras vidas, o con el registrado en las series históricas, sino con los cambios climáticos que se han sucedido a lo largo de miles y millones de años, en épocas anteriores a la aparición de *Homo sapiens*. Sólo así podremos entender los mecanismos que regulan el clima global, comprender su naturaleza y sus ritmos de cambio, y discernir la señal antropogénica en épocas más recientes.

En este artículo se pretende abordar el cambio climático desde la perspectiva temporal que aporta el registro geológico y paleontológico, y mostrar cómo el estudio de la historia climática de nuestro planeta permite contextualizar el actual cambio global.

## CLIMA Y CAMBIO CLIMÁTICO

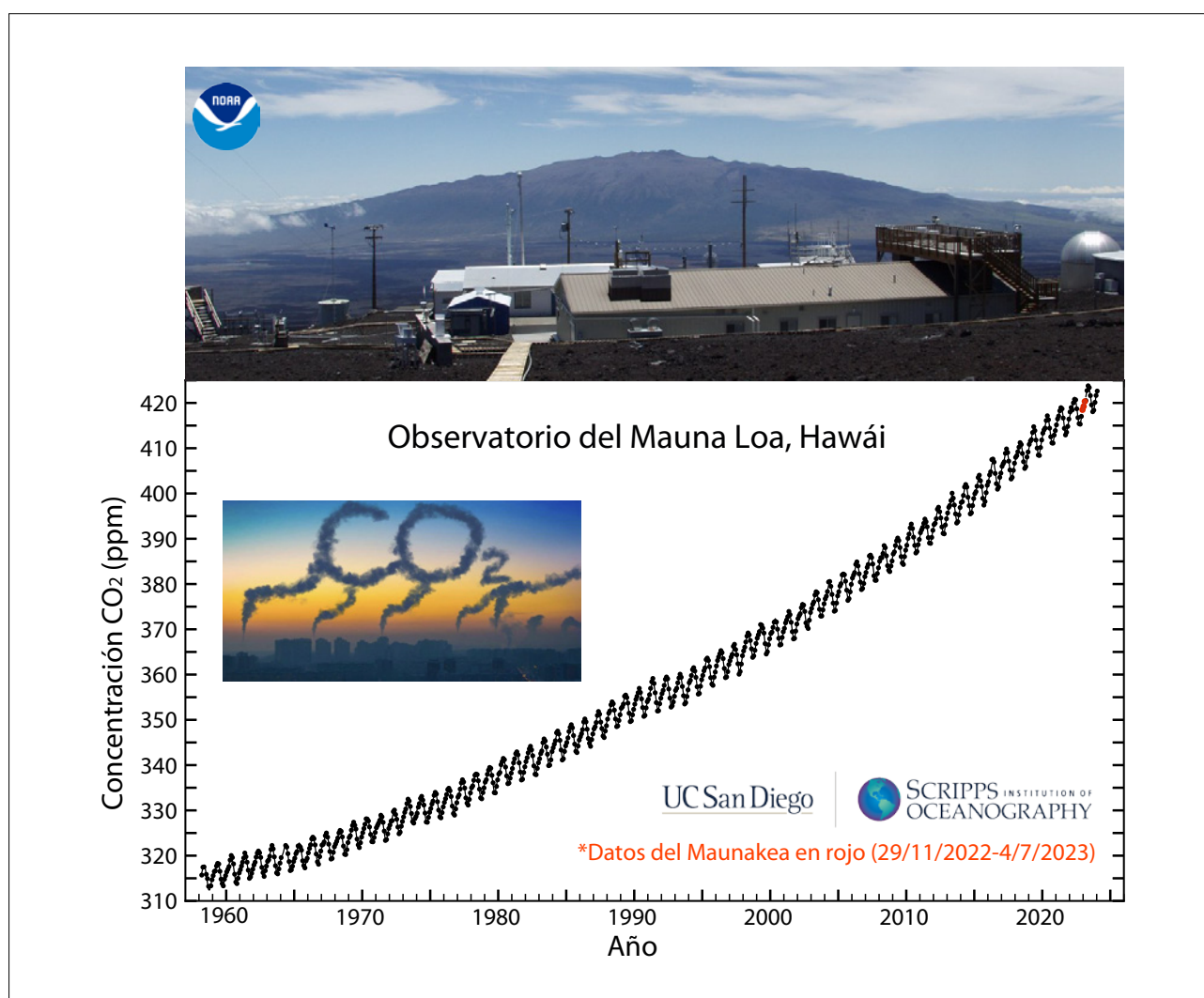
El clima representa el conjunto de condiciones atmosféricas de una región, y se caracteriza por elementos meteorológicos como la temperatura, la presión, la humedad, la precipitación o el viento. El clima global de nuestro planeta está ligado al “forzamiento radiativo” o forzamiento climático, que es la diferencia entre la energía solar absorbida por la Tierra (efecto invernadero) y la energía irradiada de vuelta al espacio (a través del albedo). Cuando se recibe más energía de la que se emite, el balance es positivo y se produce calentamiento, mientras que un balance negativo conlleva enfriamiento.

Aunque esta ecuación parece sencilla, el clima es un sistema complejo y su comportamiento es difícil de predecir, porque a las tendencias a largo plazo en la radiación solar o en los ritmos orbitales se suman fluctuaciones caóticas, resultantes de la interacción entre forzamientos, retroalimentaciones y moderadores. Las tres principales causas de la variación climática incluyen factores astronómicos, otros inherentes a nuestro propio planeta, y procesos relacionados con las actividades humanas. Entre los factores astronómicos, las variaciones de la órbita y el eje terrestres, o las manchas solares, determinan la cantidad de energía que llega desde el Sol y modulan el clima terrestre. Los procesos de nuestro planeta que influyen sobre el clima incluyen la deriva continental, la distribución de los continentes y océanos, las corrientes oceánicas, el volumen de hielo, la actividad volcánica y otras emisiones naturales de gases de efecto invernadero. Por último, las actividades humanas también tienen la capacidad de modificar el clima, por ejemplo a través de la deforestación, las emisiones de gases de efecto invernadero (como el dióxido de carbono, el metano o el óxido nitroso) o la modificación del albedo planetario, mediante la inyección de aerosoles en la atmósfera, cambios en el uso del suelo, o el depósito de partículas minúsculas de “carbono negro”, resultantes de la combustión incompleta de combustibles fósiles y biomasa. Las emisiones de dióxido de carbono o metano se deben principalmente a la quema de combustibles fósiles como carbón, gas natural o petróleo. También están ligadas a su transporte y fugas de las conducciones, a la fabricación del cemento, o a las actividades agrícolas y ganaderas. Las emisiones de metano a la atmósfera son inferiores a las de dióxido de carbono, pero el metano es un gas de efecto invernadero más potente y su capacidad para atrapar el calor en la atmósfera es 25

veces mayor, siendo responsable de más de un tercio del calentamiento antropogénico actual.

El clima actual está perfectamente documentado con mediciones instrumentales de los parámetros que caracterizan la atmósfera (temperatura, presión, precipitaciones, humedad, radiación solar, velocidad del viento, etc.) y el océano (temperatura, salinidad, estado químico de las aguas). El aumento en la concentración del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera es un componente del cambio climático global, y se ha medido de forma continua desde 1958 en el observatorio de Mauna Loa, en Hawái (Figura 1). Las

mediciones únicamente se detuvieron siete meses por la erupción del volcán Mauna Loa, a finales de 2022, y durante ese periodo de tiempo se obtuvieron en el observatorio cercano de Maunakea. La “Curva de Keeling” (Figura 1) debe su nombre a Charles David Keeling, químico estadounidense que inició la recopilación de datos y alertó sobre la posible contribución antropogénica al efecto invernadero y al calentamiento del planeta. La relación entre los gases de efecto invernadero y el aumento de temperatura ya había sido demostrada de forma experimental por Eunice Newton Foote en 1856, y en 1938 Guy S. Callendar identificó la quema de combustibles fósiles como la

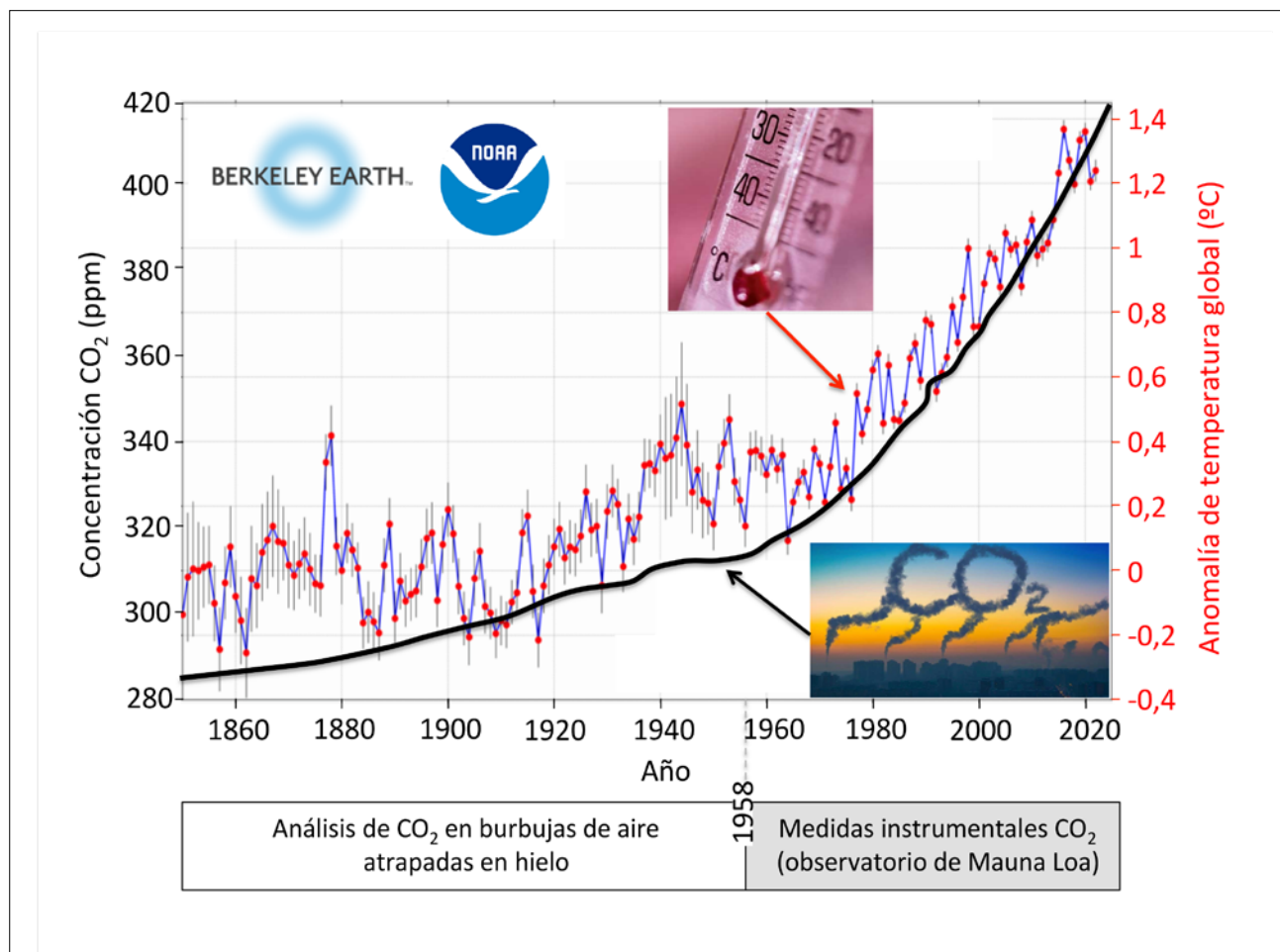


**Figura 1.** Medidas instrumentales de la concentración de  $\text{CO}_2$  atmosférico obtenidas diariamente desde 1958 en el observatorio de Mauna Loa (Hawái). La concentración de  $\text{CO}_2$  representa las medias mensuales, y se expresa en partes por millón de la fracción molar (ppm). La curva evidencia el rápido aumento del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, y su forma serrada se debe a las variaciones estacionales en la absorción o liberación de  $\text{CO}_2$  en el hemisferio Norte. Modificado de: Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego (Keeling y Keeling, 2017; Keeling et al., 2001).

principal causa del calentamiento global. El trabajo de Keeling aportó la evidencia del rápido aumento del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, y proporcionó la serie histórica más larga que existe de la concentración de  $\text{CO}_2$  atmosférico. La curva resultante muestra una tendencia ascendente desde 1958 hasta la actualidad, que se ha acelerado en los últimos años. En detalle, su forma serrada se debe a la basculación anual del hemisferio norte, acercándose al sol en verano y alejándose de él en invierno, que determina la absorción o liberación de  $\text{CO}_2$  por los bosques caducifolios (Figura 1).

El aumento en los niveles de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera durante el periodo industrial ha ido ligado a un incremento en la temperatura de  $1,4^\circ\text{C}$  con res-

pecto a la media entre 1850 y 1900 (Figura 2). El calentamiento a comienzos del siglo XX coincide con un incremento en la radiación solar, mientras que el aumento en la temperatura global desde mediados del siglo XX se relaciona inequívocamente con el incremento en la concentración de gases invernadero de origen antropogénico (IPCC, 2007) (Figura 2). La interrupción del calentamiento global entre 1940 y 1975 ha sido objeto de debate, y se ha relacionado con las emisiones masivas de aerosoles tras la Segunda Guerra Mundial, que provocaron un rápido forzamiento climático hasta que se tomaron medidas para limitar estas emisiones por sus efectos nocivos para la salud (Martín-Chivelet, 2016).



**Figura 2.** Anomalía global de temperatura relativa a la media 1850-1900 (puntos rojos, media en azul), y concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera (en negro, media anual expresada en partes por millón de la fracción molar, ppm). Los datos muestran la íntima relación entre el aumento en los niveles de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera durante el periodo industrial y el incremento en la temperatura. Figura de anomalía de temperatura modificada de [www.berkeleyearth.org](http://www.berkeleyearth.org), añadiendo datos de  $\text{CO}_2$  atmosférico de la curva Keeling desde 1958, y procedentes de análisis de las burbujas de aire atrapadas en el hielo para los años previos (NOAA Global Monitoring Laboratory).

Una vez liberado, el  $\text{CO}_2$  permanece en la atmósfera y en los océanos durante miles de años, por lo que la acumulación de emisiones ejerce un papel decisivo en los cambios climáticos forzados por el  $\text{CO}_2$ .

### ¿FORMA PARTE DE LA VARIABILIDAD NATURAL DEL PLANETA?

Debido a que los gases de efecto invernadero permanecen en la atmósfera durante miles de años, las series históricas no son suficientes para entender la evolución del clima. Es necesario un contexto temporal más amplio, a lo largo de miles y millones de años, en épocas anteriores a *Homo sapiens*. Sólo así podremos responder a la pregunta de si el actual cambio climático forma parte de la variabilidad natural del planeta.

La Paleoclimatología es una ciencia multidisciplinar que estudia el clima del pasado, sus variaciones y sus causas. Los cambios a escala geológica de los factores que determinan el clima actual, como la energía de la radiación solar, la situación astronómica, los movimientos planetarios, el relieve y la distribución de continentes y océanos, o la composición y dinámica de la atmósfera, constituyen los factores más utilizados en la deducción de los climas del pasado. Los registros paleoclimáticos aportan información del clima del pasado, que aparece recogida en archivos como el sedimento, las rocas, los fósiles, las estalagmitas de las cuevas, los anillos de los árboles, o el hielo acumulado en los glaciares.

La curva Keeling proporciona un registro continuo del  $\text{CO}_2$  atmosférico desde el año 1958, y los datos previos a estos registros instrumentales requieren estudios paleoclimáticos. En concreto, para un

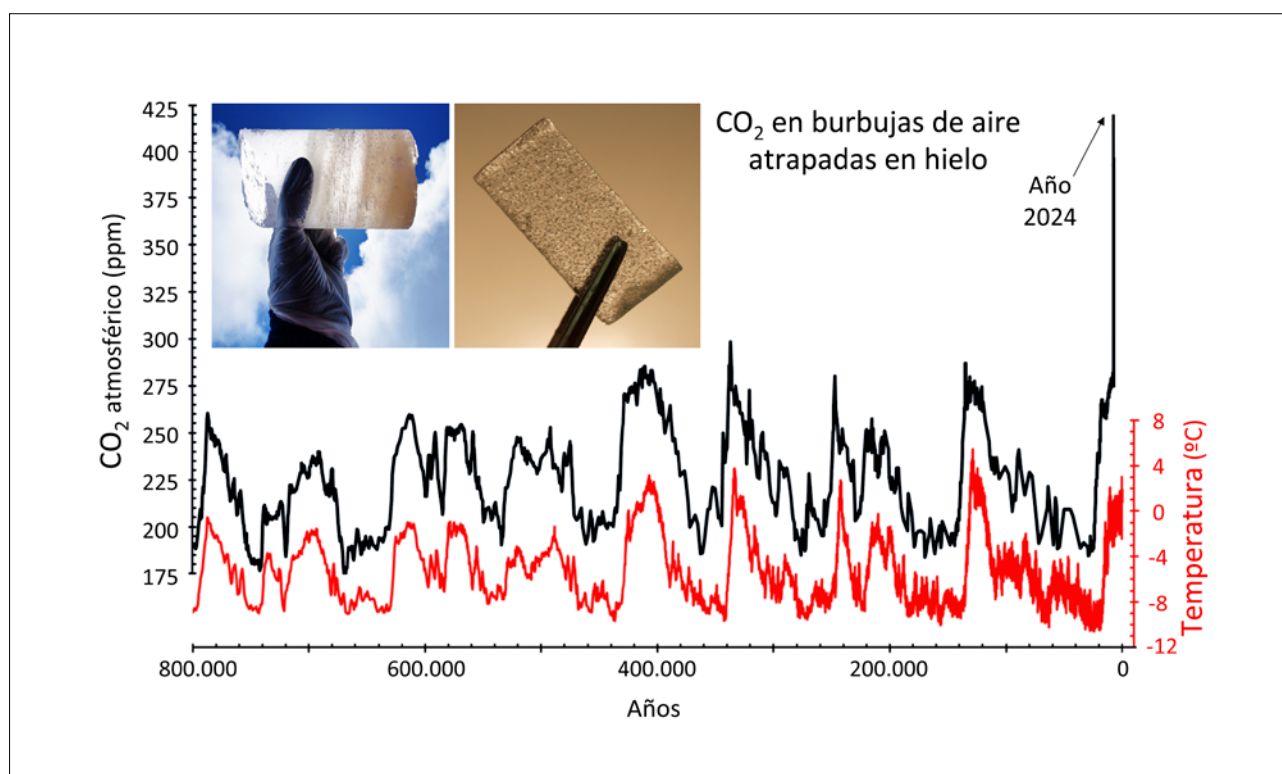


Figura 3. Concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera durante los últimos 800.000 años medida en las burbujas de aire atrapadas en el hielo (en negro, expresada en partes por millón, ppm), y diferencia de temperatura comparada con la media de los últimos 1000 años (en rojo, expresada en grados centígrados,  $^{\circ}\text{C}$ ) para el mismo intervalo. El año "cero" corresponde al año 2020. Datos procedentes de [http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/domec/domec\\_epica\\_data.html](http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/icecore/antarctica/domec/domec_epica_data.html) para los registros de hielo de la Antártida, de NOAA (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>) para las medidas actuales de dióxido de carbono, y de NASA ([http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs\\_v3/](http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/)) para la temperatura actual. Modificado de Lüthi et al. (2008). Se observa cómo la concentración actual de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera sobrepasa ampliamente la variabilidad natural del planeta de los últimos 800.000 años, y que en la actualidad se están registrando las temperaturas globales más cálidas de los últimos 100.000 años.



intervalo de miles o cientos de miles años, cuando no existían instrumentos para medir los parámetros del clima (termómetros, pluviómetros, barómetros, anemómetros, etc.), la única medida directa de la composición de la atmósfera la proporcionan las pequeñas burbujas de aire que quedaron atrapadas en la nieve (y posteriormente en el hielo) en los polos y en otras regiones donde la nieve nunca se funde. El análisis de la concentración de  $\text{CO}_2$  en estas burbujas es por tanto una medida directa de las condiciones del pasado. Así, el hielo glacial aporta un registro de la composición de la atmósfera a lo largo de cientos de miles de años.

Los análisis del aire atrapado en las burbujas de testigos de hielo de la Antártida muestran que la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera ha variado de forma cíclica a lo largo de los últimos 800.000 años, observándose picos mínimos y máximos asociados a las épocas glaciares e interglaciares, respectivamente (Figura 3). La principal causa de los ciclos glaciares e interglaciares son las variaciones en la órbita de la Tierra alrededor del Sol asociadas a los ciclos de Milankovitch, que determinan la luz solar que llega a nuestro planeta. No obstante, la magnitud total de los cambios de temperatura y volumen de hielo glacial-interglacial requiere tener en cuenta, además, los cambios en la concentración del  $\text{CO}_2$  atmosférico y las retroalimentaciones climáticas asociadas (Masson-Delmotte et al., 2013).

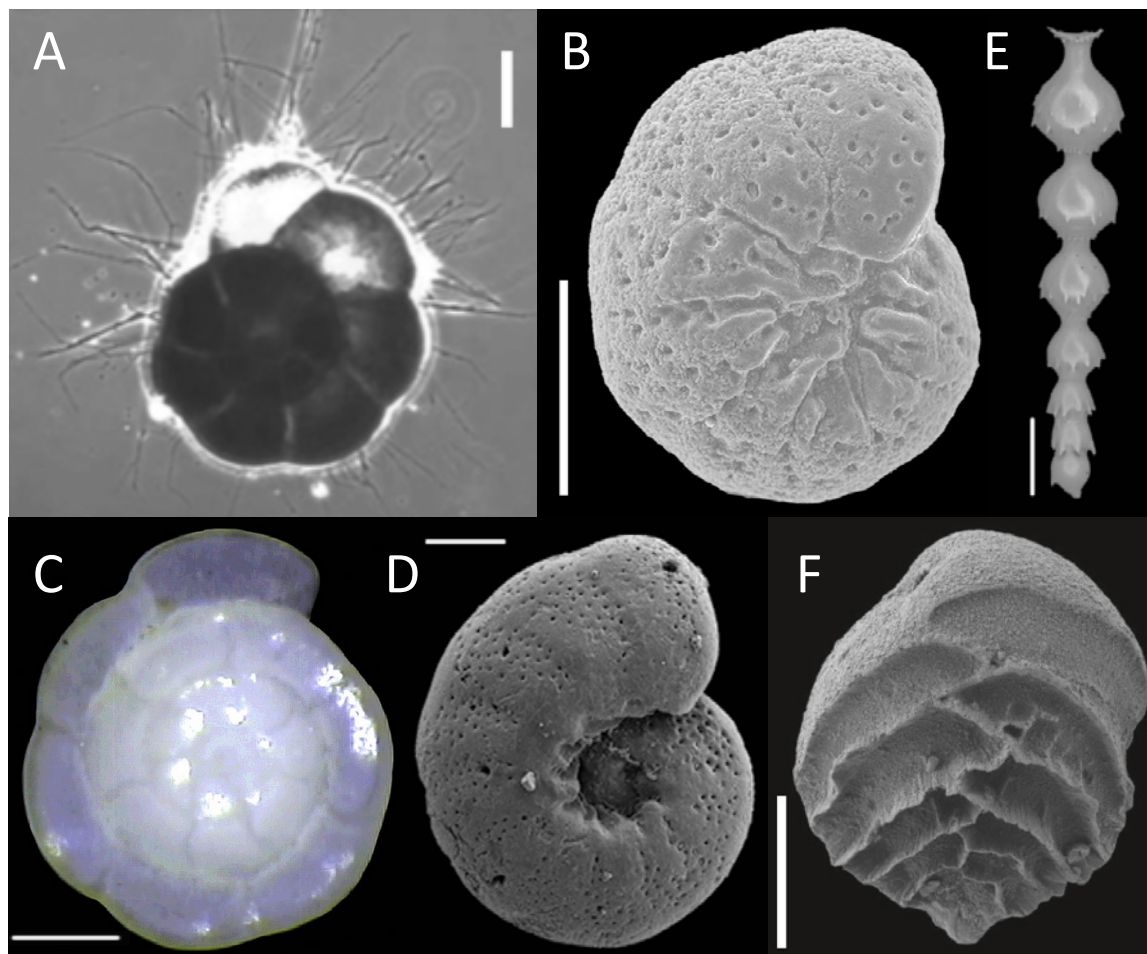
Los valores máximos de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera alcanzados durante las épocas interglaciares de los últimos 800.000 años no han superado las 300 partes por millón (ppm), pero a partir de la revolución industrial se observa un aumento del  $\text{CO}_2$  atmosférico, que crece a un ritmo aún mayor desde la Segunda Guerra Mundial hasta alcanzar los valores actuales (Figura 3). Estos valores, y la concentración de otros gases de efecto invernadero como el metano o el óxido nítrico, sobrepasan claramente la variabilidad natural del planeta durante los ciclos glaciares e interglaciares de los últimos 800.000 años. Debido a su importante efecto invernadero, estos cambios han condicionado la temperatura del planeta, y en la actualidad se están registrando las temperaturas globales más cálidas de los últimos 100.000 años (Figura 3).

En detalle, a lo largo de los últimos 5.000 años se registra una tendencia natural de enfriamiento relacionada con factores orbitales, que persistió hasta el siglo XIX (Masson-Delmotte et al., 2013) y fue revertida por el calentamiento medio anual desde el siglo XX. Las reconstrucciones de la temperatura a

escala continental muestran que durante la Anomalía Climática Medieval (años 950 a 1250) se produjeron períodos de varias décadas en los que algunas regiones fueron tan cálidas como a mediados y finales del siglo XX. Sin embargo, estos períodos cálidos regionales no fueron tan sincrónicos entre regiones como el calentamiento desde mediados del siglo XX. Las reconstrucciones climáticas y las simulaciones de los modelos indican que los cambios de temperatura entre la Anomalía Climática Medieval y la Pequeña Edad de Hielo (1450 a 1850) se debieron a una combinación de forzamiento orbital, solar y volcánico, y variabilidad interna (Masson-Delmotte et al., 2013).

Las medidas instrumentales del  $\text{CO}_2$  atmosférico desde el periodo industrial reflejan un aumento tan rápido y de tal magnitud que únicamente puede ser atribuido a la acción antropogénica (ej., IPCC 2007), no siendo posible justificarlo mediante otros factores que afectan al clima. La antigua concepción de que los efectos de la actividad humana eran insignificantes frente a las fuerzas naturales que controlan el clima, ha cambiado radicalmente ante las evidencias del aumento de gases de efecto invernadero desde finales del siglo XVIII, cuyo impacto en la composición química de la atmósfera y en los ciclos biogeoquímicos del planeta se hizo evidente a mediados del siglo XX (Cearreta, 2021). La actividades humanas han conducido a la Tierra a una fase nueva de su historia geológica, conocida informalmente como el Antropoceno, modificando la trayectoria de muchos procesos clave como por ejemplo las tasas de extinción, la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, calentamiento, ascenso del nivel del mar, o acidificación de los océanos (Cearreta, 2021).

Para ampliar aún más el contexto temporal de estos cambios, se estudian las rocas y los sedimentos que se depositaron hace millones de años, y los fósiles que contienen, que son indicadores indirectos del clima del pasado. Así, la Paleontología y la Geología permiten poner en contexto el actual cambio global, y entender su excepcionalidad. Los fósiles marinos de tamaño microscópico son especialmente útiles para estudiar el clima del pasado, porque son muy abundantes y fáciles de encontrar y permiten hacer estudios cuantitativos y estadísticos de sus poblaciones, además de análisis geoquímicos en sus caparazones. Entre los microfósiles marinos, destacan los foraminíferos (Figura 4), un filum de protozoos que protegen su única célula mediante una concha que puede estar formada por una única cámara, o por varias que se conectan entre sí a través de un orificio interno



**Figura 4. Foraminíferos bentónicos actuales (A) y fósiles (B-F) de distintas morfologías. (A) Se observan las distintas cámaras de la concha espiralada, y los pseudópodos extendidos hacia el exterior (*Ammonia tepida*. Fuente: J. P. Debenay). (B-D) Foraminíferos bentónicos de conchas espiraladas, sus caparazones muestran perforaciones a través de las cuales extendían los pseudópodos. (E) Foraminífero bentónico uniseriado. (F) Foraminífero bentónico biseriado. Las escalas equivalen a 100 micras.**

llamado foramen, y que da nombre al grupo. A través de pequeñas perforaciones de la concha, extienden sus pseudópodos para desplazarse, alimentarse, y relacionarse con el medio. En cuanto a su modo de vida, se diferencian los foraminíferos planctónicos, que flotan en la columna de agua, y los bentónicos, que viven en el fondo marino. Los foraminíferos bentónicos ocupan el mayor hábitat del planeta, los fondos marinos, en todas sus profundidades y latitudes, son indicativos de cambios globales y constituyen el grupo estrella en estudios paleoclimáticos (Alegret et al., 2021). El análisis geoquímico de las conchas de

los foraminíferos bentónicos permite reconstruir la temperatura global de hace millones de años (Figura 5), aportando el contexto temporal necesario para evaluar el actual cambio climático. Al igual que en épocas recientes, las temperaturas inferidas a partir de foraminíferos bentónicos para los últimos 66 millones de años muestran que la temperatura global va íntimamente ligada a la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico (Figura 5). Entre hace 66 y 34 millones de años, las elevadas temperaturas y la alta concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera caracterizaron un “Planeta Cálido” e incluso un “Planeta Invernadero”, en el

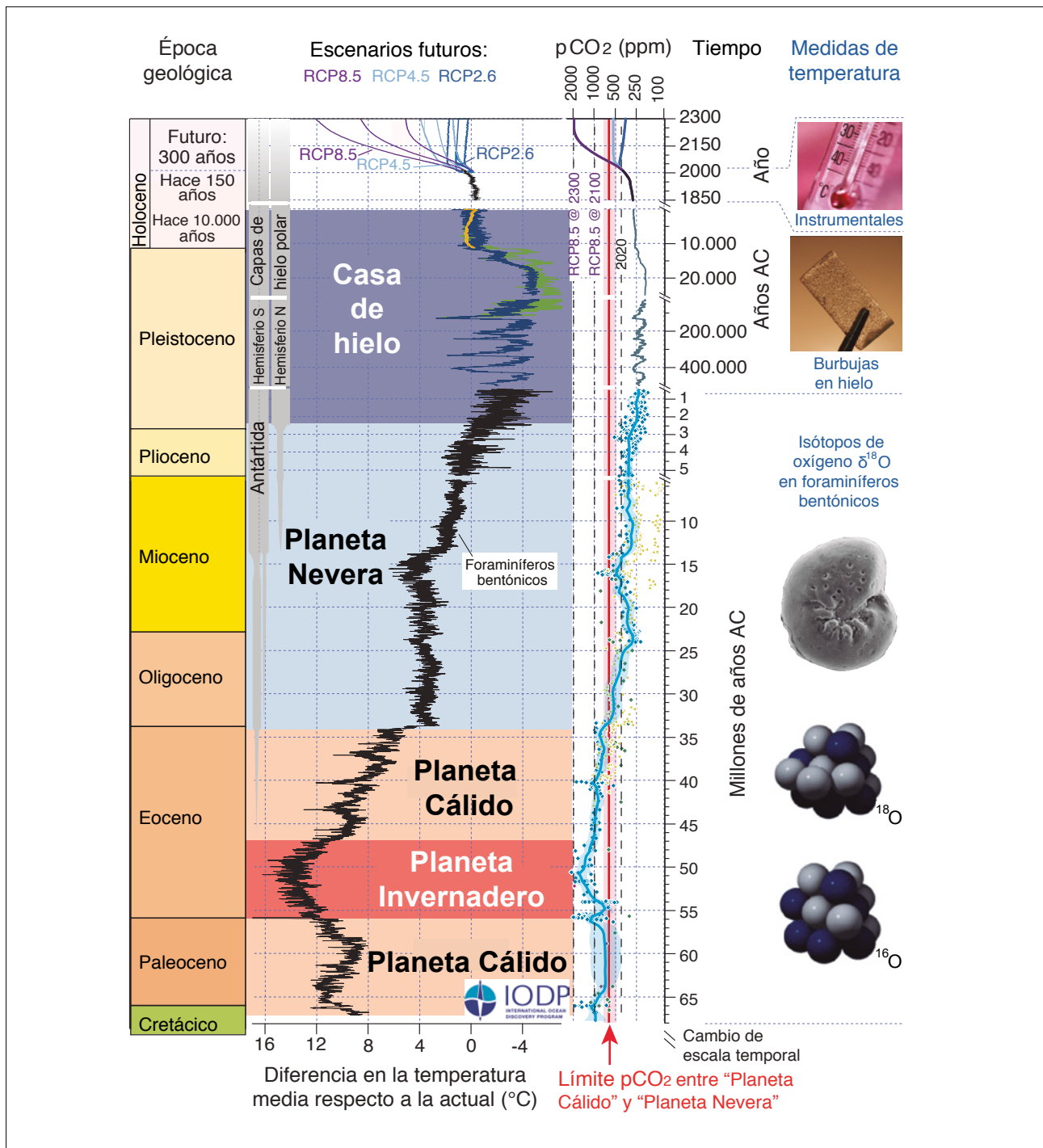


Figura 5. Variaciones en la temperatura y en la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico para los últimos 67 millones de años, y proyecciones para los próximos 300 años. El nivel actual de CO<sub>2</sub> atmosférico es el mayor registrado en los últimos 2 millones de años, y está muy cerca de alcanzar el nivel (línea roja) que marca la diferencia entre un "Planeta Nevera" y un "Planeta Cálido" o "Invernadero". Fuentes de los datos de temperatura: entre 70 y 0,5 millones de años, isótopos de oxígeno medidos en conchas de foraminíferos bentónicos; entre 800.000 años y el año 0, burbujas atrapadas en hielo (proyectos EPICA y NGRIP, y Marcott et al. 2013); hace 150 años, medidas instrumentales HadCRUT4. Curvas de temperatura y pCO<sub>2</sub> cedidas por Thomas Westerhold; los cambios relativos en la temperatura del pasado se han convertido a diferencias de temperatura con respecto a la actualidad. Las proyecciones para el año 2300 muestran tres escenarios futuros de temperatura global (Palmer et al., 2018) en función de tres vías de concentración de CO<sub>2</sub> (RCP). Las barras grises marcan estimaciones del volumen de hielo en cada hemisferio. AC: Antes de Cristo.

que no había capas de hielo permanente, y se alcanzaron temperaturas de hasta 16 °C por encima de la media actual. El enfriamiento progresivo dio paso a un planeta más fresco o “Planeta Nevera” a partir de 34 millones de años, cuando comenzaron a aparecer capas de hielo permanente. El descenso en el CO<sub>2</sub> atmosférico y en la temperatura global desde hace 2 millones de años dio paso a un planeta aún más frío, denominado “Casa de Hielo”, en el que se alternan los ciclos glaciares e interglaciares.

Esta serie temporal larga muestra que el nivel actual de CO<sub>2</sub> atmosférico es el mayor registrado en los últimos 2 millones de años, y que estamos muy cerca de alcanzar el nivel de CO<sub>2</sub> que marca la diferencia entre un “Planeta Nevera” y un “Planeta Cálido” o “Planeta Invernadero” (Figura 5).

#### MIRANDO AL PASADO PARA ENTENDER EL FUTURO: LOS EVENTOS HIPERTERMALES

El estudio del clima de hace entre 66 y 34 millones de años cobra por tanto especial relevancia, porque constituye un excelente ejemplo geológico en el que las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico fueron muy similares a las que vamos a alcanzar en breve según las simulaciones (Figura 5). Además, este intervalo de tiempo resulta especialmente interesante porque incluye varios eventos rápidos de calentamiento que se superponen a los cambios graduales en el clima. Estos eventos tuvieron lugar durante el Paleoceno y el Eoceno y se conocen como eventos hipertextermales (Figura 6). Cada uno presenta una distinta magnitud y velocidad, y su estudio permite calibrar y conocer mejor el actual cambio climático.

Las temperaturas más elevadas de los últimos 66 millones de años se alcanzaron en el límite entre el Paleoceno y el Eoceno (hace 56 millones de años), momento en el que se registra el mayor de los hipertextermales. Conocido como el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, este evento se relaciona con la emisión de gases invernadero a través de diversos mecanismos naturales, que causaron un aumento de unos 6°C en la temperatura global (Figura 6). Las fuentes más plausibles incluyen dióxido de carbono procedente de los volcanes y del permafrost, metano (procedente de los hidratos del metano almacenados en los márgenes continentales, y metano termogénico), y C<sup>12</sup> liberado por la quema de turba y carbón y

por la oxidación de la materia orgánica continental. Los mecanismos concretos que provocaron la liberación de grandes cantidades de carbono (C<sup>12</sup>) al océano y a la atmósfera son objeto de debate (Dunkley Jones et al., 2013). La intensa actividad volcánica en el Atlántico Norte debió de contribuir, liberando CO<sub>2</sub>, elevando la temperatura en altas latitudes, cambiando las corrientes oceánicas y provocando la desestabilización de los hidratos del metano almacenados en los márgenes continentales, que a su vez contribuyeron al efecto invernadero y a un sucesivo calentamiento de los océanos. Además del calentamiento global de todo el planeta (en todas las latitudes y profundidades, incluidos los fondos oceánicos), los ciclos del carbono e hidrológico se vieron intensamente afectados, y provocaron fenómenos meteorológicos extremos. En algunas regiones oceánicas se registra una disminución de la oxigenación de las aguas o disolución de carbonatos profundos (Thomas, 2007; Alegret et al., 2021). La retroalimentación del proceso forzó el sistema como una goma elástica hasta que se rompió, alcanzando un punto de no retorno que instauró un nuevo escenario climático durante más de nueve millones de años: el “Planeta Invernadero”, sin capas de hielo permanentes y con las temperaturas más elevadas de los últimos 66 millones de años.

Durante el hipertextermal del Paleoceno-Eoceno, muchas especies marinas y terrestres evolucionaron y migraron a altas latitudes, y en el Ártico se han encontrado fauna y flora típicamente tropicales, como cocodrilos, nenúfares, tortugas y palmeras (Figura 7). Por el contrario, los foraminíferos bentónicos que vivían en los fondos oceánicos sufrieron extinciones (Alegret et al., 2021), al igual que los corales y algas en los arrecifes.

Resulta interesante comparar el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno con el actual cambio climático. La liberación gases de efecto invernadero durante el hipertextermal del Paleoceno-Eoceno se produjo de forma lenta, a lo largo de unos 6.000 años, mientras que en la actualidad se está liberando un mayor volumen de gases y de forma mucho más rápida (Figura 8). La velocidad de emisión de gases de efecto invernadero resulta crítica porque tiene consecuencias en la geoquímica de los océanos. En la actualidad el sistema no tiene tiempo para adaptarse, y los modelos predicen un descenso en el pH de las aguas superficiales y acidificación oceánica. Estos procesos ya se están empezando a observar en la actualidad. La acidificación de las aguas superficiales está afectando a invertebrados marinos, que son la base de la cadena alimentaria de muchos peces, comprometiendo la cantidad y calidad nutricio-

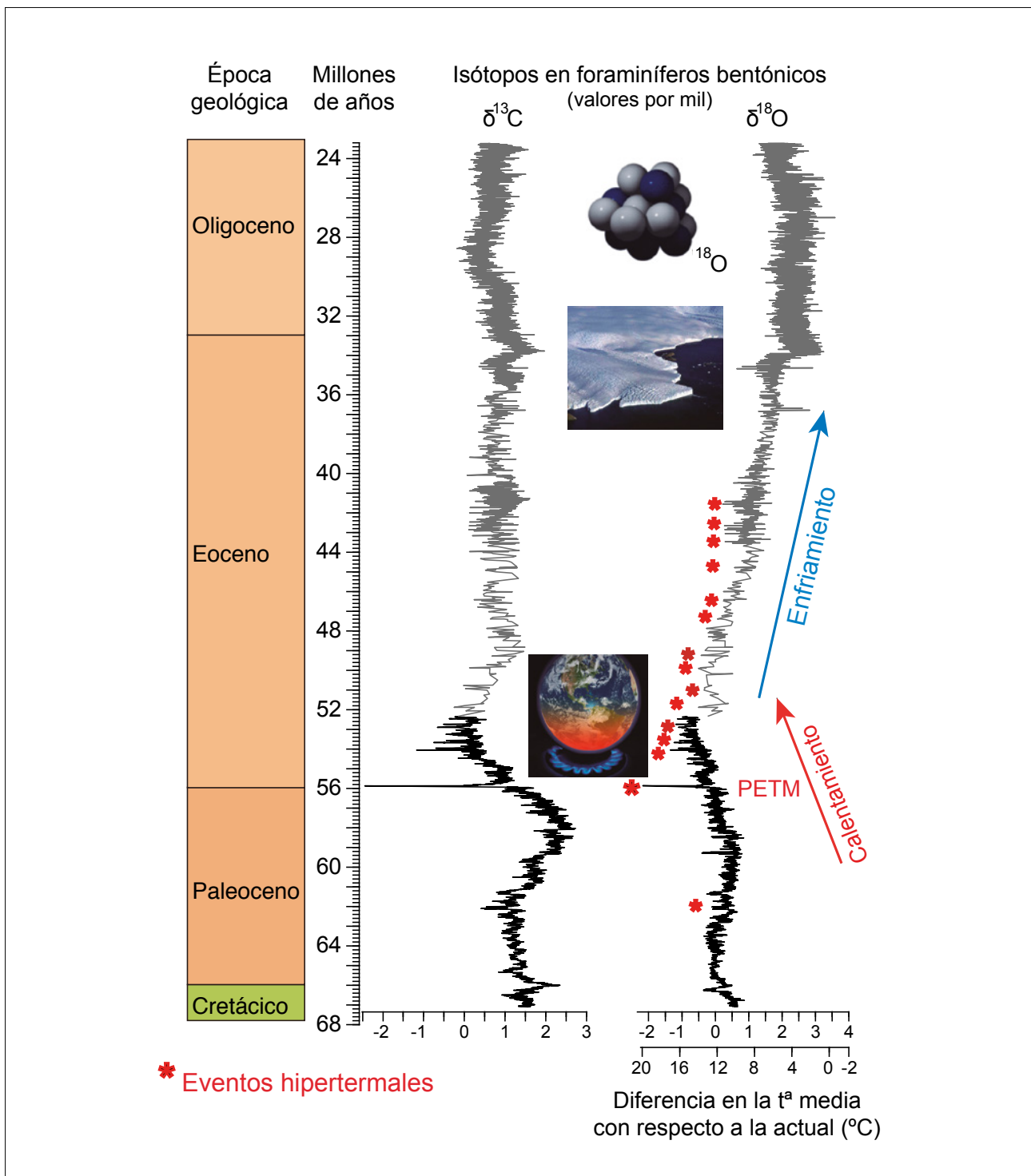


Figura 6. Variaciones en los isótopos estables de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) y oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) medidos en foraminíferos bentónicos entre hace 23 y 67 millones de años. El  $\delta^{13}\text{C}$  mide la relación entre los isótopos  $^{13}\text{C}$  y  $^{12}\text{C}$  en foraminíferos, con respecto a un estándar, y el  $\delta^{18}\text{O}$  mide la relación entre los isótopos  $^{18}\text{O}$  y  $^{16}\text{O}$  en foraminíferos, con respecto a un estándar; representan cambios en el ciclo del carbono y en la temperatura, respectivamente. Durante el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM) se observa cómo el calentamiento va ligado a alteraciones del ciclo del carbono (a través de la liberación de gases de efecto invernadero). Los asteriscos rojos señalan los rápidos eventos de calentamiento (hipertérmicos) que se superponen a los cambios graduales en la temperatura global (indicados con flechas: calentamiento en rojo y enfriamiento en azul). Modificado de Alegret et al. (2021).

### Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (PETM)

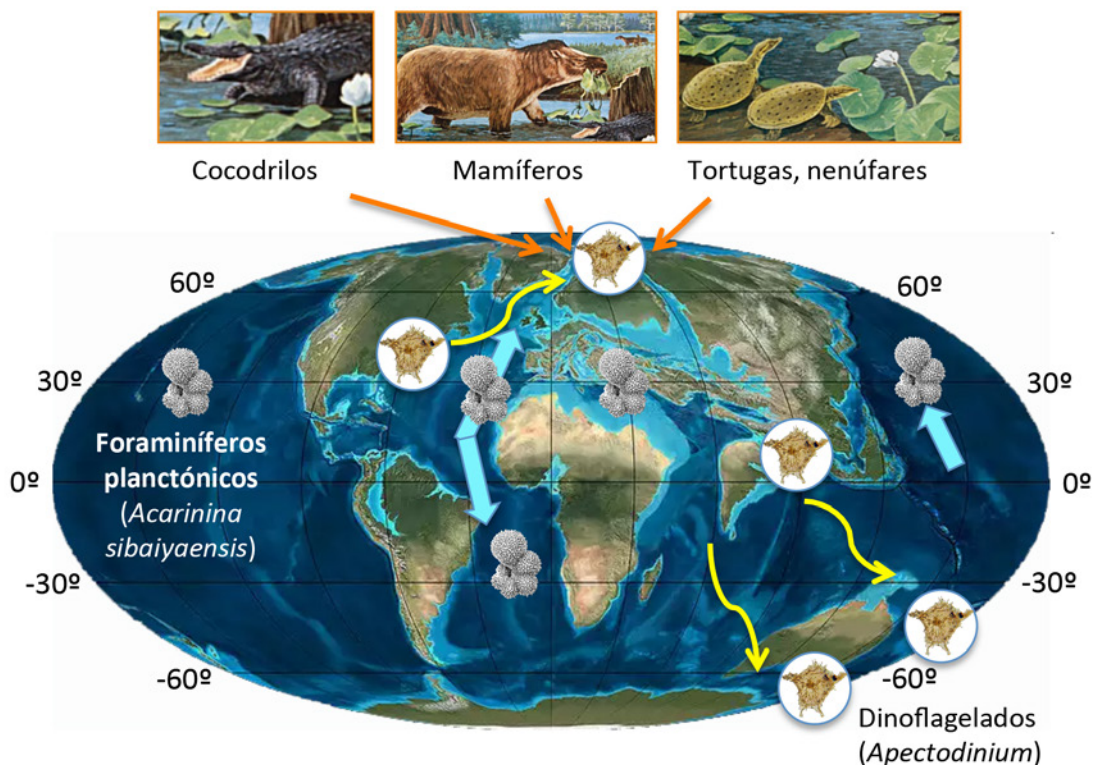


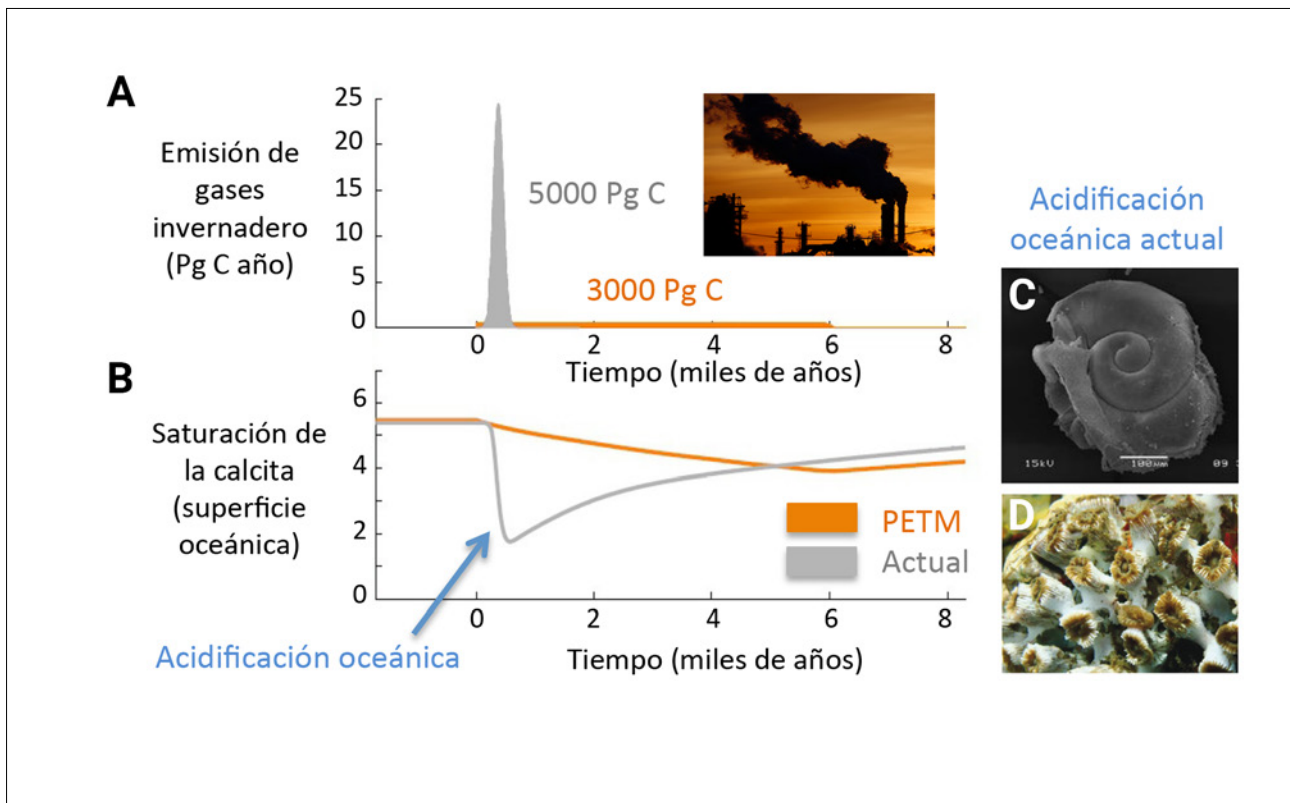
Figura 7. Reconstrucción de continentes y océanos hace 56 millones de años, y migración de especies típicas de medios tropicales a altas latitudes durante el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno.

nal de los productos del mar, que a su vez constituyen la principal fuente de proteínas de más de mil millones de personas. La acidificación oceánica está fomentando la proliferación de algas tóxicas, la propagación de contaminantes como metales pesados, y está afectando a los corales y arrecifes y a su capacidad de absorber el exceso de  $\text{CO}_2$ . Llama la atención que la velocidad de calentamiento en la actualidad ( $1,6\text{ }^\circ\text{C}$  por siglo) es de 2 a 30 veces más rápida que la registrada durante el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno. El drástico descenso en los isótopos de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) durante el límite Paleoceno/Eoceno (Figura 6) sugiere una liberación de carbono ligero ( $\text{C}^{12}$ ) de cuatro a ocho veces mayor que las emisiones antropogénicas desde que comenzó la era industrial hasta la actualidad (Marland et al., 2005), y es comparable a las previsiones para finales del siglo XXI.

El estudio de este y de otros eventos hipertermales de distinta magnitud, duración y velocidad, permite evaluar la respuesta del planeta a eventos globales de calentamiento, y contribuye a mejorar los modelos climáticos que se emplean para hacer simulaciones del clima del futuro.

### CONSIDERACIONES FINALES

La Tierra ha experimentado cambios climáticos desde que se formó como planeta. A diferencia de los anteriores, el cambio climático actual no se debe a causas naturales, sino que está siendo provocado por la acción de nuestra especie, *Homo sapiens*.



**Figura 8.** (A) Rapidez (expresada en miles de años en el eje horizontal) y magnitud (eje vertical) de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el PETM (naranja) y en la época industrial (gris). (B) Efecto de las emisiones representadas en (A) en la geoquímica de los océanos, expresado como variaciones en la saturación de la calcita en las aguas superficiales (eje vertical, un descenso en los valores representa menor pH de las aguas, y acidificación oceánica). A mayor rapidez de las emisiones (A), se produce disolución del carbonato (B), tal y como indican las líneas grises. (C, D) Disolución de organismos marinos en la actualidad: (C) pterópodo, (D) coral *Cladocora caespitosa*. Modificado de Alegret (2024).

Siempre ha habido cambios climáticos, y siempre los habrá, pero el registro geológico y los fósiles indican que las emisiones de gases de efecto invernadero durante la época industrial, y el cambio climático asociado, no tienen precedentes en los últimos 66 millones de años. Cualquiera que sea su desenlace, no impedirá que nuestro planeta y la vida sobre él continúen su largo viaje. Pero las condiciones ambientales quizás no sean las adecuadas para *Homo sapiens*. Las simulaciones para los próximos 300 años (Figura 5), indican que estamos muy cerca de alcanzar el nivel crítico de CO<sub>2</sub> atmosférico que marca la diferencia entre el “Planeta Nevera” y el “Planeta Cálido” o “Invernadero” del Eoceno. A corto plazo, se producirá un calentamiento global, fenómenos meteorológicos intensos, cambios en la circulación oceánica, acidificación de los océanos, la pérdida del hielo permanente y el ascenso del nivel del mar. Todo ello condiciona la habitabilidad del

planeta para nuestra especie. Las consecuencias a medio y largo plazo no se conocen con exactitud, y el estudio de los hipertermales del pasado permite mejorar los modelos predictivos, y realizar simulaciones.

La historia climática de nuestro planeta a lo largo de millones de años revela, además, la existencia de rápidos cambios climáticos que llevaron a alcanzar puntos sin retorno, a partir de los cuales no fue posible volver a las condiciones previas y se instauraron escenarios climáticos muy distintos. *Homo sapiens* ha logrado alterar en apenas un siglo la variabilidad natural del planeta, y la Paleoclimatología pone la voz de alarma sobre posibles puntos de no retorno en la situación climática actual, que podrían causar daños irreversibles sobre los ecosistemas, y comprometer la habitabilidad del planeta para nuestra especie.



*Homo sapiens*, esa especie recién llegada que ha cambiado el clima del futuro, tiene la capacidad de reducir, en la medida de lo posible, las emisiones de gases de efecto invernadero, e implantar mecanismos de mitigación y adaptación que mantengan los peligros climáticos dentro de los niveles tolerables para nuestra civilización.

## AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte de los proyectos de I+D+i PID2019-105537RB-I00, financiado por MCIN / AEI/10.13039/501100011033/ y "FEDER Una manera de hacer Europa", y PID2023-149894OB-I00, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

## CONFLICTO DE INTERESES

La autora de este artículo declara no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alegret L. (2024). La especie de cambió el clima del futuro, y se asustó leyendo el pasado. Prensas de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza. ISBN: 978-84-1340-806-4.
2. Alegret L., Ortiz S., Arenillas, I., Molina E. (2010). What happens when the ocean is overheated? The foraminiferal response across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum at the Alamedilla section (Spain). *Geological Society of America Bulletin*, 122 (9/10): 1616-1624.
3. Alegret, L., Arreguín-Rodríguez, G. J., Traviña-Moreno, C. A., Thomas, E. (2021). Turnover and stability in the deep sea: benthic foraminifera as tracers of Paleogene global change. *Global and Planetary Change*, 196, 103372.
4. Cearreta, A. (2021). La perspectiva del Antropoceno: Una mirada geológica al cambio climático. *Mètode Science Studies Journal*, 110: 45-51.
5. IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
6. IPCC, 2023. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
7. Keeling, R. F. y Keeling, C. D. (2017). Atmospheric Monthly In Situ CO<sub>2</sub> Data - Mauna Loa Observatory, Hawaii (Archive 2023-06-04). En: Scripps CO<sub>2</sub> Program Data. UC San Diego Library Digital Collections. <https://doi.org/10.6075/J08W3BHW>
8. Keeling, C. D., Piper, S. C., Bacastow, R. B., Wahlen, M., Whorf, T. P., Heimann, M. and Meijer, H. A. (2001). Exchanges of atmospheric CO<sub>2</sub> and 13CO<sub>2</sub> with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000. I. Global aspects, SIO Reference Series, No. 01-06, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, 88 págs.
9. Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J.-M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K. y Stocker, T.F. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, 453: 379-382.
10. Marcott, S. A., Shakun, J. D., Clark, P. U., Mix, A. C. (2013). A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science*, 339: 1198-1201, doi: 10.1126/science.1228026
11. Marland, G., Boden, T. A. y Andres, R. J. (2005). Global, Regional, and National Fossil Fuel CO<sub>2</sub> Emissions. En: Trends: A Compendium of Data on Global Change. CO<sub>2</sub> Information Center, Oak Ridge Nat. Laboratory. [http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/meth\\_reg.htm](http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.htm)



12. Martín-Chivelet, J. (2016). *Memorias de un clima cambiante*. Batiscafo, S.L., Barcelona, 142 pp.
13. Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, A., González Rouco, J.F., Jansen, E., Lambeck, K., Luterbacher, J., Naish, T., Osborn, T., Otto-Bliesner, B., Quinn, T., Ramesh, R., Rojas, M., Shao, X. y Timmermann, A. (2013). Information from Paleoclimate Archives. En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
14. Palmer, M. D., Harris, G. R. y Gregory J. M. (2018). Extending CMIP5 projections of global mean temperature change and sea level rise due to thermal expansion using a physically-based emulator. *Environmental Research Letters* 13, 084003, doi: 10.1088/1748-9326/aad2e4
15. Romanello, M., di Napoli, C., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., et al. (2023). The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms. *Lancet* 2023; 402: 2346–2394, doi: 10.1016/S0140-6736(23)01859-7

---

**Si desea citar nuestro artículo:**

Alegret Badiola L. Una perspectiva temporal del cambio climático. *RACSG*.2025;113(01):40-53.  
rac.2025.113.1.org03

**ORIGINAL**

# **NAVIGATING THE ETHICAL AND SOCIETAL CHALLENGES OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE: ENSURING RESPONSIBLE INNOVATION**

## ABORDANDO LOS RETOS ÉTICOS Y SOCIALES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL: HACIA UNA INNOVACIÓN RESPONSABLE

**Amparo Alonso Betanzos<sup>1</sup>**

1. CITIC (Research Center in Information and Communication Technologies). University of A Coruña. SPAIN

### **ABSTRACT**

Artificial intelligence (AI) is a new revolution, with rapid advances driven by its increasingly widespread adoption across multiple sectors, from healthcare and education to finance and transportation. AI has many benefits, including improved decision-making, increased efficiency, and the creation of new business models. However, these advances entail seismic changes in the economy, employment, and education that need to be addressed to ensure responsible and ethical AI use. Key concerns include bias, discrimination, privacy, transparency, accountability, surveillance, and misuse. Bias in AI algorithms, for instance, can lead to unfair treatment that exacerbates social inequalities; privacy concerns arise from the vast amounts of personal data mined by AI systems; a lack of transparency in some complex algorithms poses challenges for accountability, making it difficult to understand and question output; and potential misuse or malicious use of AI, through deepfakes or autonomous weapons, raises security and ethical issues. Automation of tasks in many areas is also likely to lead to significant job displacement and will require adapted educational systems. Balancing the transformative potential of AI with the need to responsibly and sustainably address social and economic challenges, while promoting ethical use of AI that maximizes its benefits for humanity, requires a multidisciplinary effort involving governments, researchers, technologists, and society at large.

**Keywords:** Artificial Intelligence; Ethical and Trustworthy AI.

### **RESUMEN**

La inteligencia artificial (IA) es una nueva revolución, con rápidos avances impulsados por su adopción cada vez más generalizada en múltiples sectores, desde la atención sanitaria y la educación hasta las finanzas y el transporte. La IA tiene muchos beneficios, como son una mejor toma de decisiones, una mayor eficiencia y la creación de nuevos modelos de negocio. Sin embargo, estos avances implican enormes cambios en la economía, el empleo y la educación que deben abordarse para garantizar un uso responsable y ético de la IA. Las principales preocupaciones incluyen el sesgo, la discriminación, la privacidad, la transparencia, la rendición de cuentas, la vigilancia y el uso indebido. El sesgo en los algoritmos de IA, por ejemplo, puede conducir a un trato injusto que exacerba las desigualdades sociales; las preocupaciones sobre la privacidad surgen de las grandes cantidades de datos personales extraídos por los sistemas de inteligencia artificial; la falta de transparencia en algunos algoritmos complejos plantea desafíos para la rendición de cuentas, lo que dificulta comprender y cuestionar los resultados; y el posible uso indebido o malicioso de la IA, a través de deepfakes o armas autónomas, plantea cuestiones éticas y de seguridad. También es probable que la automatización de tareas en muchas áreas conduzca a un importante desplazamiento de puestos de trabajo y requerirá sistemas educativos adaptados. Equilibrar el potencial transformador de la IA con la necesidad de abordar de manera responsable y sostenible los desafíos sociales y económicos, y al mismo tiempo promover un uso ético de la IA que maximice sus beneficios para la humanidad, requiere un esfuerzo multidisciplinar que involucre a gobiernos, investigadores, tecnólogos y a la sociedad en general.

**Palabras clave:** Inteligencia artificial; Retos éticos para IA confiables.



Correspondencia

Amparo Alonso Betanzos

Academician of the Royal Academy of Exact,  
Physical, and Natural Sciences of Spain

E-mail: amparo.alonso.betanzos@udc.es

## 1. A BRIEF HISTORY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Artificial intelligence (AI), currently one of the most frequently mentioned terms in the media, refers to a present and future where intelligent programs and machines perform tasks that previously required human intelligence. However, although this term may seem to correspond to the 21st century, its origins date back to 1956, when, at a summer seminar at Dartmouth College (USA), a handful of scientists gathered together to ponder the question "Can machines think?" This question had been posed in 1950 by one of the fathers of AI, Alan Turing, in an article published in the journal *Mind*. Since then, the discipline has alternated between periods of commercial success and decades confined to academic environments (known as "AI springs" and "AI winters", respectively), due to issues related to software maintenance, scalability, and other challenges that hindered AI applications to real-world problems. However, these cyclical phases of slow and mostly incremental progress have, by now, given way to AI as the leading technology driving the transition to a new society 5.0. This is partly due to several disruptions of recent years, brought about by factors such as the vast availability of data due to massive digitalization processes, the availability of the necessary computational power, and key advances in software. In this new context, companies find they can monetize previously non-exploited data. The convergence of all these factors has positioned AI as a mature technology with significant economic and social impact.

So, what is AI? Drawing on many different definitions, we can briefly define AI for our purposes as a scientific discipline aimed at creating computer systems capable of performing, with a degree of autonomy, tasks or processes that would require certain levels of intelligence in a human. This includes research into perception and visual recognition, natural language understanding and speech recognition, and automated learning and reasoning. In the recently published EU AI Act (the world's first such

regulation)<sup>1</sup>, an AI system is defined (in Article 3) as *"a machine-based system that is designed to operate with varying levels of autonomy and that may exhibit adaptiveness after deployment, and that, for explicit or implicit objectives, infers, from the input it receives, how to generate outputs such as predictions, content, recommendations, or decisions that can influence physical or virtual environments"*.

Until about a decade ago, advances in AI occurred slowly and incrementally. However, after the convergence of the key factors mentioned above, the field began to experience further disruptions that significantly altered the way AI was developed and how it was perceived by society. Notable early disruptions occurred in the 2010s, led by the system known as AlphaGo, which became the first AI system to defeat a professional human champion in Go, a game regarded as the most challenging of classic games (including chess) due to its complexity. Employing a different approach to the brute-force predecessors used for chess, AlphaGo successfully deployed new machine learning techniques such as deep neural networks and reinforcement learning. Those innovations opened up the way to rapid progress in other areas like natural language processing and computer vision, enabling AI systems to match and even surpass human-level performance in tasks such as object recognition, automatic translation, recommendation systems, and more. Advancing scientific discovery was exemplified in the 2010s by AlphaFold, a revolutionary system that accurately predicted the 3D structures of proteins for a large percentage of the human proteome (98.5%), as well as for around 20 other organisms. By 2022, this tool had determined the structures of approximately 200 million proteins. More recent major disruptions have been the emergence of generative AI (which creates new content) and large language models (LLMs, trained on vast amounts of text); these have led to the develop-

<sup>1</sup> <https://artificialintelligenceact.eu/ai-act-explorer/>

ment of systems like ChatGPT, DALL-E<sup>2</sup>, Mistral<sup>3</sup>, and similar. In quickly generating text, images, and voice outputs, such tools demonstrate an astonishing level of natural interaction between humans and machines. Interestingly, until the arrival of newer versions that integrate text, image, and more recently voice, there was little debate about AI's ability to achieve the original vision of its pioneering researchers: creating human-like general AI, i.e., systems as capable as humans in adapting, learning, and applying knowledge across a broad range of tasks and domains<sup>4</sup>. Advances until recently have been largely confined to narrow applications using intelligent systems developed to solve very specific problems within limited domains.

## 2. THE PRESENT CONTEXT AND REGULATORY EFFORTS

In the last two decades, AI has emerged as a transformative technology with the potential to significantly alter various aspects of our everyday lives and reshape the global socioeconomic landscape. From automating routine tasks to revolutionizing healthcare through personalized treatments, AI is redefining industries and presenting both new opportunities and challenges. The AI market is growing exponentially, with the compound annual growth rate estimated to be 35.7% for the 2024-2030 period. Research and innovation, mainly driven by major US technology companies, are leading to the rapid adoption of AI technology across industries and public administrations, resulting in significant changes in the automotive, healthcare, finance, and retail sectors, among others. As mentioned above, contributing to this acceleration is the availability of vast sets of historical data, accessible through advanced technologies like deep learning and generative AI techniques. Given the growing strategic importance of AI, the sector is currently characterized by a high level of merger and acquisition activity among industry leaders, driven by the desire to access new technologies and AI talent and establish a foothold in a rapidly growing market.

---

2 <https://platform.openai.com/docs/models>

3 <https://mistral.ai/>

4 <https://lamaletadeportbou.com/articulos/so-bre-la-inteligencia-de-la-inteligencia-artificial/>

AI faces many challenges, and, as with all technological advances, those challenges are not limited to scientific progress or developments in various fields, but also imply significant repercussions for society in general. The transformation resulting from rapidly advancing technological change is profoundly social, and concerns raised include increased inequality and the impact on employment. To equip future generations with the skills necessary to thrive in an AI-driven world, the rapid pace of technological progress requires reforms at all education system levels and highlights the need for reskilling, upskilling, and lifelong learning.

Returning briefly to a more technical aspect, researchers who have experimented with GPT-4 (at the time, the latest version of ChatGPT) claim that it is approaching a level of intelligence comparable to that of humans, and even suggest that it could be viewed as an early-stage version of general AI. However, this remains highly debatable, as significant limitations have yet to be overcome, including the lack of cohesion between learned components, insufficient deep reasoning, limited common sense, and limited generalization abilities.

What is clear, however, is that beyond technical challenges, society needs to tackle the ethical dilemmas posed by AI systems. These include the large-scale use of data, decision-making biases, privacy concerns, security risks, the potential for widespread persuasion and influence, and questions of accountability. To address these issues, the call for AI regulation has become more pressing, with countries currently taking different approaches. In the EU, the focus is on creating ethical, trustworthy, and human-centric AI systems. Its AI Act<sup>5</sup>, which entered into force on 1 August 2024, is broadly based on a risk-level approach; it also includes content regarding generative AI models that was not on the table when the regulation was originally proposed in 2021, highlighting the rapid evolution of technology. While the USA as yet has no binding federal law that specifically regulates AI, the White House (borrowing many foundational ideas from the EU framework) issued an Executive Order in October 2023 aimed at ensuring safe and reliable AI deployment. The approach in the USA to date has been decentralized, allowing states to draft their own regulations. Colorado, in May 2024, became the first US state to enact a regulatory framework governing AI development and use, while California, home to the

---

5 <https://artificialintelligenceact.eu/>



main US technology companies, has recently passed bills regulating AI (testing for threats to critical infrastructure, curbing children's exposure to algorithms, limiting the use of deepfakes, and more). Finally, although with a different focus than the EU and USA, China has also implemented legislation (in 2022) that regulates recommendation systems and generative AI.

The AI regulatory landscape is evidently far from uniform, and concern is growing regarding international coordination in this area. As AI technologies rapidly advance, international bodies are collaborating to develop multilateral AI governance frameworks. Inter-governmental bodies (such as UNESCO and ISO) and several regional entities are all engaged in efforts to create cohesive global frameworks that address AI's challenges and ensure its ethical use. Taking steps to guide this process, the UN has published a resolution<sup>6</sup> that underscores the need to ground AI development in principles aligned with international human rights law, reinforces the importance of ethical standards, and urges nations to prioritize transparency, accountability, and fairness in their AI policies. Maintaining trust and sustainable growth in the AI industry requires that the private sector companies playing a crucial role in shaping AI's future develop and deploy AI technologies that comply with emerging regulations. Ensuring their compliance is essential not only for ethical reasons but also to ensure the prioritization of data privacy, transparency, and legal liability. However, the challenge is that compliance will vary significantly across different jurisdictions. This fragmentation risks the division of the global AI ecosystem into separate regulatory regions, each with its own set of rules and standards. Despite these challenges, the push for AI regulation is a truly global effort, with laws and policies being developed on six continents. The AI Safety Summit<sup>7</sup>, the G7 agreement on Guiding Principles and a Code of Conduct on Artificial Intelligence<sup>8</sup>, regulation in China, the US Executive Order, and the EU AI Act are all examples of wide-ranging efforts to uphold responsible AI governance, demonstrating that nations are starting to align on key principles.

6 <https://documents.un.org/doc/undoc/ltd/n24/065/92/pdf/n2406592.pdf>

7 <https://www.aisafetysummit.gov.uk/>

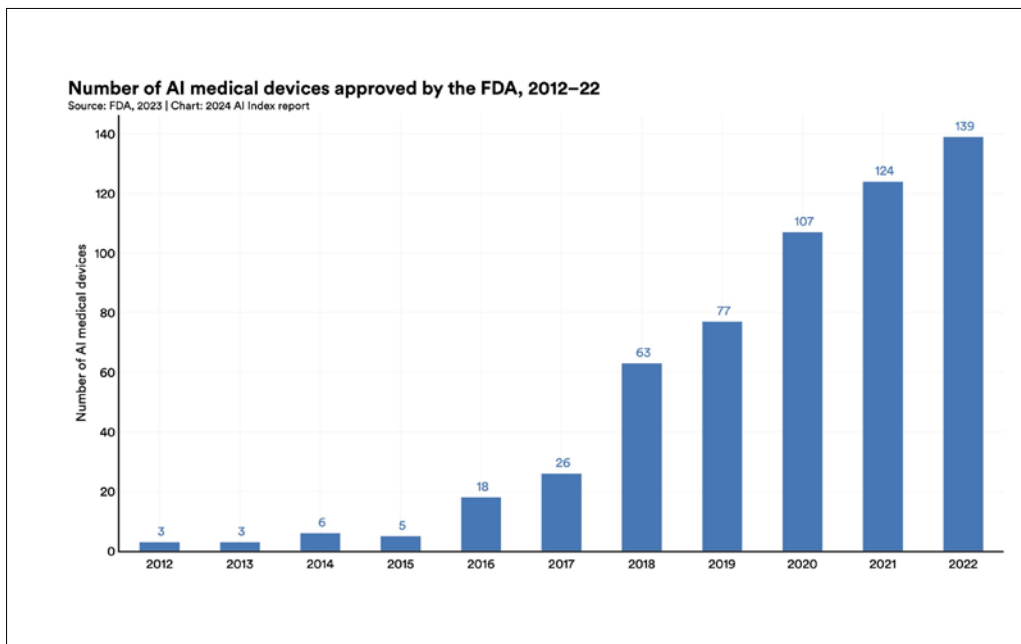
8 <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/hiroshima-process-international-guiding-principles-advanced-ai-system>

Ultimately, for AI to benefit society, its governance must be rooted in international cooperation. While national regulations may differ, the collective effort of governments, international organizations, and the private sector will be critical in ensuring that AI serves humanity responsibly and equitably. While international cooperation is crucial to long-term solutions, in the short term we need to address specific high-risk areas, including data privacy, ownership, access, bias, explainability, transparency, and sustainability. The following sections delve deeper into these challenges.

### 3. THE CHALLENGES AHEAD

AI undoubtedly represents a technological opportunity that we must learn to harness effectively. As highlighted by the authors of one of the most widely used AI textbooks : *"Our civilization is the product of our human intelligence. If we gain access to greater intelligence in machines, the ceiling of our ambitions is substantially raised. The potential for AI to free humanity from repetitive work and dramatically increase the production of goods and services could herald an era of peace and prosperity. The ability to accelerate scientific research could result in the cure of diseases and provide solutions for climate change and resource scarcity"*.

New areas of AI application are continuously emerging, with the fintech, education, and healthcare sectors set to undergo significant transformations due to AI's influence. Figure 1, for instance, shows how the number of AI medical devices approved by the US Federal Drug Administration has grown apace in just a decade, suggesting that the potential to develop new drugs, create more personalized treatments, and provide individualized health input throughout our lives is becoming a reality. Virtual doctors and educators can potentially provide low-cost access to high-quality services, reaching areas where these services are unavailable, and thereby helping restore our welfare society in an economically viable way. AI is also being explored as a tool to assist populations at risk of exclusion and in underdeveloped geographic areas, and, importantly, as a critical component in the fight against climate change. Also attracting increasing attention is how AI can enhance civic participation by enabling citizens to engage more actively in the governance of their institutions.



**Fig. 1. Artificial intelligence is increasingly being used for real-world healthcare, with the number of medical devices using AI multiplying more than 40-fold since 2012.**

However, we face considerable risks if AI technologies are not developed and used responsibly. Some of these challenges are briefly explored below (see figure 2).

### 3.1. Ethical challenges

Key factors driving the rapid advancement of AI are the availability of vast amounts of data across virtually all sectors and the fact that it is a transversal discipline applicable to nearly every field. Adherence to fundamental ethical principles, as outlined in the European Commission's 2019 publication on Ethics Guidelines for Trustworthy AI<sup>9</sup>, is crucial. Six fundamental aspects, discussed below, are data privacy and security; bias, discrimination, and the perpetuation of prejudices; transparency and explainability; responsibility and accountability; environmental sustainability; and social impact and justice.

**Data privacy and security.** The volume of data we generate daily is enormous. In 2023 alone, around 120 ZB (zettabytes) of data were created, and the trend is for the volume to double every two years.

<sup>9</sup> <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai>

As previously noted, virtually all sectors and human activities are undergoing digitalization, with data being collected from sensors, mobile devices, web environments, etc. in various formats (text, video, images, voice, etc). These large volumes of data are used to train AI algorithms. However, since some of this data may be sensitive personal or confidential information (e.g., medical or financial records), it is crucial to implement a governance model that ensures data privacy and security of access. Ensuring data privacy means protecting individuals' identities and guaranteeing that their data is only used with their consent for clearly specified purposes. Data access security is essential to prevent unauthorized access, breaches, or misuse. For instance, if sensitive information on a cured cancer survivor is accessed without authorization and revealed, it could affect the decision on whether this person is granted medical insurance. Guarantees must be put in place that ensure that data is protected, individual privacy is respected, identity is not revealed, and data is used ethically and only for the specified purpose.

**Bias, discrimination, and the perpetuation of prejudices.** Many routine applications and tools rely on AI. For instance, AI algorithms perform part or all of the tasks related to obtaining directions to a specific location or receiving content recommendations on a website. AI also assists in decision-making in more critical contexts, such as selecting job can-



didates, approving bank loans, and diagnosing diseases, although some of the regulations mentioned earlier mandate that final decisions should be made by human experts. AI algorithms can more rapidly and more accurately automate decision-making processes involving the analysis of large datasets than humans. However, since these algorithms learn from real-world data which is inherently imperfect, detecting bias is challenging, as the data might reflect historical inequalities or social stereotypes. If not addressed, such biases can inadvertently replicate and even exacerbate existing discrimination, producing unequal outcomes for different groups. This issue is particularly of concern when AI is used for critical decision-making in areas like hiring, loans, law enforcement, and healthcare. For instance, in 2019 in the USA, a hospital algorithm designed to predict which patients would require additional medical attention was significantly biased in favor of white patients. The bias, reduced by 80% once identified, was discovered when it was determined that using healthcare expenditure as an input parameter was not appropriate because economic disparities meant that healthcare expenditure by black patients with similar health conditions was frequently lower than that of white people. Another example is facial recognition systems, which are less accurate for people with darker skin and for females. Although error rates have been reduced in recent years, the accuracy rates of above 90% reported for most systems cannot be considered universal, as their training datasets

are frequently unbalanced. AI-based facial recognition, for instance, has caused several people of color to be falsely identified as suspects in criminal investigations, wrongfully arrested and charged, or denied employment<sup>10</sup>. AI algorithm design itself can be discriminatory. Early virtual assistants, typically designed with female voices and submissive characteristics, reinforced traditional gender roles<sup>11</sup> by subtly perpetuating the stereotype of the subservient and accommodating woman. AI aimed at predicting potential repeat offenders can result in unfair treatment of certain demographic groups, wrongly denied access to parole programs<sup>12</sup>. To build ethical AI systems that do not reinforce harmful prejudices or contribute to social inequality, biases need to be actively identified and mitigated in both datasets and algorithms, which can be done by auditing AI algorithms and systems for fairness, using more diverse datasets, and ensuring that AI decision-making is transparent and explainable.

10 <https://www.irwinmitchell.com/news-and-insights/expert-comment/post/102j5zu/uber-eats-compensates-driver-after-its-ai-facial-recognition-tool-discriminated-a>

11 <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367416>

12 <https://www.propublica.org/article/machine-bias-risk-assessments-in-criminal-sentencing>



Fig. 2. Some ethical considerations to be taken into account in AI.



**Transparency and explainability.** AI algorithms are becoming increasingly accurate, but this precision often implies greater complexity (numerous parameters and processing layers), particularly in models based on deep learning. Consequently, although inputs and outputs are known, the black-box nature of AI systems is becoming increasingly opaque, which makes it challenging to understand or interpret exactly how the output was produced. Transparency refers to the ability to understand how an AI system operates (data sources, algorithms, and processes), whereas explainability refers to a system's decisions being understandable to humans in terms of clear and accessible reasons for why a particular outcome was obtained. Transparency is crucial in areas like healthcare, criminal justice, and finance, where the impact of AI decision-making may be critical. An AI system that does not provide clear reasons or justifications for its decisions makes it difficult to evaluate whether a decision is fair, unbiased, or even correct; people should be able to understand, for instance, on what basis an AI algorithm denies a loan or diagnoses a medical condition. Explainability when non-existent can lead to mistrust in AI systems, especially when outcomes seem unjust or biased, and also makes it hard to hold them accountable or challenge their decisions. Transparency and explainability are both key to bolstering trust and ensuring fairness in automated decision-making. Promoting both requires designing systems that can articulate decision-making processes in a way that is understandable to humans, e.g., simplifying models, using algorithms that are inherently more interpretable, or developing techniques that provide insights into complex models. In high-stakes environments in particular, AI systems need to be transparent and explainable so that they can be fully audited to ensure that users, regulators, and stakeholders can trust their operations and their outputs.

**Responsibility and accountability.** These aspects address the need for someone to be held responsible or accountable for discrimination, harm, or error resulting from increasingly complex AI decisions and interactions between humans and machines. The many different parties involved in the design, commercialization, and use of AI systems, however, complicate the identification of a possible culprit for poor or harmful outcomes. Responsibility, referring to the obligations of all those involved in the design, development, deployment, and use of AI systems, concerns AI companies in general, policymakers, and users, each playing a different role. Designers and

developers are responsible for creating systems that are free from bias, safe, transparent, and reliable; deployers must ensure that their AI systems comply with ethical standards and the relevant regulations; and users need to understand the capabilities and limitations of AI to avoid misuse. Accountability addresses the need to determine who is liable when the system fails, harms, or errs. This is a particularly complex issue, first because multiple actors (developers, companies, organizations, users, etc) are typically implicated, and second, because both ethical and legal considerations apply; for an accident involving a self-driving vehicle, for instance, should the programmer, the distributor, the maintenance technician, or the driver be held responsible? In the USA in March 2018, an Uber driver was found guilty of negligent homicide because a built-in emergency braking system had been disabled while the car was in autonomous mode<sup>13</sup>. However, who might have been taken to court if that system had been activated?

**Environmental sustainability.** Sustainability focuses on minimizing the environmental impact of AI technologies while ensuring that development and deployment contribute positively to long-term societal goals. While AI advances have led to the development of increasingly accurate models, they have also significantly increased the computational resources required to train and run those models<sup>14</sup>, raising concerns about the carbon footprint and overall environmental sustainability of AI systems. A major sustainability challenge is the energy consumption associated with training and running complex models, and especially deep learning algorithms. Training ChatGPT-3, for instance, consumed approximately 1,300 MWh of energy, for carbon emissions of close to 550 tons equivalent to 3 round trip flights between New York and San Francisco, or driving 123 gasoline vehicles during a year. Consuming even more energy than model training are real-time AI applications like speech recognition and recommendation systems. Energy is also consumed in our use of these systems, in which the energy demands appear to be considerably higher

---

13 <https://www.nytimes.com/2018/05/24/technology/uber-autonomous-car-ntsb-investigation.html>

14 <https://theconversation.com/is-generative-ai-bad-for-the-environment-a-computer-scientist-explains-the-carbon-footprint-of-chatgpt-and-its-cousins-204096>



<sup>15,16</sup>: Approximately half a million kilowatt-hours of electricity are needed daily to handle around 200 million requests. For perspective, this amount of energy could power an average U.S. household, which consumes about 29 kWh per day, for over 17,000 days. Another sustainability concern is the growing need for extensive data storage infrastructure as AI systems come to rely on increasingly large datasets for training. The data centers housing the servers that process and store data consume vast amounts of electricity and water for cooling. In 2019, MIT reported that cloud computing had a higher carbon footprint than the airline industry and that a single data center was capable of consuming as much electricity as 50,000 homes<sup>17</sup>. These resource needs continue to rise, with new resource-guzzling AI tools, such as the recent multimodal ChatGPT that combines text, images, and voice, suggesting that this trend is unsustainable. As for the substantial water usage required to cool servers, data centers use water from 90% of the U.S. watersheds, ranking them among the top 10 commercial water users in that country<sup>18</sup>. As an example, in 2021, to maintain the appropriate temperature in its data centers, Google needed around 1,7 million liters of water per day<sup>19, 20</sup>. It is clear that we urgently need to move towards adopting a more sustainable approach to developing and deploying AI models that enhance accuracy while also reducing the corresponding carbon footprint—ideally aiming for net zero emissions to prevent AI from becoming an environmental time-bomb. More sustainable, or green, AI is characterized by a low carbon footprint, smaller models, lower computational complexity, and

greater transparency, achievable through strategies such as leveraging edge computing capabilities and employing modular deep learning models. Green AI has two dimensions, referred to as "green-in" AI and "green-by" AI. Green-in AI is focused on designing more energy-efficient systems, optimizing algorithms, and adopting sustainable data storage and processing practices, whereas green-by AI is concerned with enhancing eco-friendly practices and applying AI to environmental and social challenges like climate change, waste management, energy efficiency, conservation efforts, etc. AI models, for instance, can predict extreme weather patterns, optimize energy grids, and help monitor deforestation and biodiversity loss. Finally, an emerging concept is circular AI focused on sustainability-by-design, which ensures that systems can be reused, repurposed, or recycled at the end of their useful life. This involves building AI systems that are modular, transparent, and easy to update and maintain, reducing the need for frequent replacements and the retraining of new models.

**Social impact and justice.** AI can have a significant positive impact on society, but it also poses certain challenges. One issue is the exacerbation of inequalities between countries. While AI has the capacity to drive economic growth, improve healthcare, and enhance education, uneven development and deployment across different world regions will widen existing gaps between technologically advanced developed countries and less developed countries. North America, Europe, and certain parts of Asia have the technical, financial, and educational resources needed to invest in AI research and to develop sophisticated AI systems, but a divide is growing with most developing countries, which lack the necessary infrastructure, expertise, and capital to keep pace with AI advances. Thus, while some nations can leverage AI-driven innovation to their benefit, other nations are left behind, unable to leverage AI even for such critical areas as healthcare, education, and economic growth. Another relevant issue is the concentration of talent. Research at the frontier of knowledge tends to be clustered in a reduced number of elite universities, private companies, and government institutions, leading to unequal opportunities for innovation. Talent is also becoming concentrated where better opportunities are available, which means a brain-drain of key human resources from poorer countries that, in turn, leads to their reliance on technology imports with the consequent dependence on more advanced economies. Another source of concern regarding many developing countries, deri-

15 <https://towardsdatascience.com/chatgpts-electricity-consumption-7873483feac4/>

16 <https://alltechmagazine.com/chatgpt-uses-17000-times-more-energy-us-family/>

17 <https://www.scientificamerican.com/article/science-needs-to-shrink-its-carbon-footprint/>

18 <https://www.hivenet.com/post/tech-needs-to-reduce-its-water-consumption-in-a-thirsty-world>

19 <https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/our-commitment-to-climate-conscious-data-center-cooling/>

20 <https://www.techtarget.com/searchdatacenter/tip/How-to-manage-data-center-water-usage-sustainably>



ved from the fact that AI systems need to be trained with large, high-quality datasets to work effectively, is the lack of local data and difficulties in generating and collecting data, due to an underdeveloped digital infrastructure. Using AI models trained on datasets from the developed world is not a viable option, as such models perform poorly or have unintended consequences when applied in different cultural, social, or economic contexts. This misalignment can perpetuate inequality by failing to meet the unique needs of underrepresented populations. The potential for AI to widen economic disparities between countries is also a matter of concern, as AI-driven productivity and efficiency gains in advanced economies will lead to greater economic growth and increased competitiveness, leaving developing nations at risk of being left behind in the global economy. The scenario is one in which the benefits of AI will be disproportionately captured by a few wealthy countries, thereby deepening the economic divide and reducing opportunities for equitable development. Efforts to close the gap between advanced and developing countries require international cooperation in the form of global partnerships that facilitate knowledge transfers, share AI resources, and support initiatives that prioritize the needs of developing countries. Additionally, investment in AI education and skills training in underdeveloped regions can help cultivate the local talent needed for these countries to build their own AI capabilities. By fostering inclusive AI development, the global community can work to narrow the digital divide and ensure that AI contributes to a more just and equitable world for all.

### 3.2. Economy, employment, and education

The influence of AI in the economy is indisputable, with generative AI in particular expected to have a substantial impact on the global economy. In 2023, the five largest companies in the world by market capitalization were US technology companies (Apple, Microsoft, Nvidia, Alphabet, and Amazon), all involved in AI. According to the European Parliament, the global AI market, valued at over €130 billion in 2023, is projected to expand to nearly €1.9 trillion in value by 2030<sup>21</sup>. Most investment in AI now comes from the private sector, with the USA leading investment in 2023 (€62.5 billion), followed by China (€7.3 bi-

llion). Private AI funding in the EU and UK combined was €9 billion in 2023; between 2018 and the first three quarters of 2023, the EU received €32.5 billion in AI investments, compared to €120 billion secured by the USA, with firms like OpenAI and Anthropic particularly contributing to widening the gap<sup>22</sup>. AI use has grown significantly in organizations and is being adopted in various operational areas, most particularly in the finance, pharmaceuticals, healthcare, and education sectors, highlighting how AI, as a strategic priority, is significantly transforming business operations across a wide range of industries. Emerging AI startups at the forefront in developing cutting-edge robotics, biotechnology, and personalized education solutions are attracting substantial venture capital and becoming significant contributors to the growing technology industry. While they challenge established firms, startups also broaden business opportunities and foster a more dynamic and varied economy.

The job market is also undergoing profound transformation by AI, with a recent IMF study concluding that AI will affect around 40% of jobs worldwide, replacing some and complementing others. While employees performing routine data processing and assembly line work are clear candidates to be replaced by AI systems, a differentiating aspect from previous technological change is that AI is also affecting highly skilled and qualified jobs. The significant changes to employment patterns will create both opportunities (new and better jobs) and challenges (downgraded and disappearing jobs) for the workforce in several sectors, including human resources, production, risk management, and strategic planning. One of the most notable impacts of AI is the automation of routine and repetitive tasks, leading to increased efficiency and cost savings for companies, but also resulting in job displacement for roles that are highly susceptible to automation, such as in the administrative and legal fields<sup>23</sup>. Some jobs will remain broadly the same, except that the human will require new skills to be able to effectively interact with technology. Leading to potentially higher wages due to increased skills are jobs where human intelligence and AI work in cooperation. According to the IMF, AI's impact on

---

21 [https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2024-08/SR-2024-08\\_EN.pdf](https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2024-08/SR-2024-08_EN.pdf)

---

22 <https://stateofeuropantech.com/>

23 <https://www.gspublishing.com/content/research/en/reports/2023/03/27/d64e052b-0f6e-45d7-967b-d7be-35fabd16.html>



employment will vary depending on a country's economic development level, ranging from up to 60% in advanced economies, to 40% in emerging economies and 26% in low-income countries<sup>24</sup>. The ILO (International Labour Organization) has also warned that AI could disproportionately affect women, particularly in administrative roles where female employment rates are high<sup>25</sup>.

According to the OECD, jobs in manufacturing and finance are likely to be the most negatively impacted by rapid advances in technology, while jobs in agriculture, farming, fishing, associative activities, extractive industries, and construction are expected to remain largely unaffected. How work is structured will need to evolve, especially in terms of upskilling to enable effective human-machine collaboration. AI adoption could potentially exacerbate inequality by opening a wider divide between individuals with and without sought-after skills—a disparity that is likely to be further exacerbated in individual economies and across the global economic landscape. This scenario is compounded by the fact that competition is already intensified by workforce globalization and remote work, as local companies now have to face off against international firms that offer fully remote positions, with better salaries, more attractive projects, and more dynamic career paths. This issue poses a significant challenge for companies and nations alike, as rapid technological progress (including in generative AI), decreasing costs, and the increasing availability of AI-savvy workers suggest that OECD countries may witness dramatic shifts in the coming decade.

New job profiles are likely to emerge in areas such as programming, consultancy, scientific and technical fields, telecommunications, media, and publishing, and evidently, the demand will grow, and wages will increase, for professionals with advanced technical skills and expertise in AI, machine learning, data science, and robotics. Contributing to job creation and economic growth will be entirely new AI-related industries and business models, such as those centered around AI ethics, AI-driven healthcare solutions,

and smart technologies. Moreover, AI has the potential to enhance human work rather than replace it, since by automating routine tasks, it enables workers to focus on more complex and creative aspects of their jobs. In healthcare, for instance, AI can assist doctors by analyzing medical data, enabling them to spend more time on patient care and complex diagnostics, while in the creative industries, AI tools can implement repetitive tasks and so free up professionals to engage in higher-level creative processes.

In relation to education, integrating AI in the workforce poses immediate and significant challenges regarding the future. There is a growing need for reskilling and upskilling initiatives to help workers transition to new roles and adapt to the evolving job market. Educational institutions and organizations need to develop training programs that equip individuals with the skills needed for AI-related jobs and that ensure a suitably skilled workforce for the future. Educational levels from early childhood to pre-tertiary stages will need to focus on the development of basic skills such as communication abilities, critical thinking, and creativity, while third-level education will need to ensure deeper scientific and technological knowledge and to offer flexible and interdisciplinary curricula that include ethics and responsibility issues.

In sum, given that AI is reshaping the employment landscape in negative as well as positive ways, to develop the talent that will be needed in the coming years and to ensure that workers are equipped to thrive in an AI-driven economy, proactive measures are needed that address potential job displacement, reorient the workforce, and adapt education systems. Crucial to navigating the impact of this transformative technology on society is balancing the economic benefits of AI with labor- and education-oriented strategies.

#### 4. CONCLUSIONS

A balanced and mindful approach is urgently needed regarding the ethical aspects of AI and its potential impact on the economy, employment, and education. Regarding the economy, AI offers great opportunities for efficiency and innovation, but also raises challenges related to the concentration of power and inequalities between countries and regions. It is therefore crucial to

24 <https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2024/01/14/ai-will-transform-the-global-economy-lets-make-sure-it-benefits-humanity>

25 <https://webapps.ilo.org/static/english/intserv/working-papers/wp096/index.html>



promote policies that ensure an equitable distribution of the benefits of AI. In terms of employment, automation and the transformation of production processes are reshaping the labor landscape, creating new jobs while rendering others obsolete. This calls for a commitment to reskilling, upskilling, and lifelong learning to prevent segments of the population from being left behind. It is also important to ensure that AI's impact on workers is positive and that effective human-machine cooperation is fostered. Finally, the educational sector will need to adapt, adopting a more interdisciplinary approach that promotes not only technical skills, but also critical thinking, creativity, and ethical responsibility. Curricula in particular need to include the development of the kind of human skills that complement AI, thereby ensuring that future generations are equipped to thrive in a constantly evolving environment. Finally, AI must be designed, developed, deployed, and used transparently, fairly, and responsibly, respecting fundamental rights and avoiding the perpetuation of biases and inequalities. Only through ethical governance can we ensure that AI has a positive and sustainable impact on society.

#### TRANSPARENCY STATEMENT

The author of this article declares that they have no conflicts of interest regarding the content presented in this work.

#### BIBLIOGRAPHY

1. Bolón-Canedo, V., Morán-Fernández L., B. Cancela, and A. Alonso-Betanzos. 2024. "A Review of Green Artificial Intelligence: Towards a More Sustainable Future." *Neurocomputing* 599. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128096>.
2. Bubeck, S., Chandrasekaran V., Eldan R., and et col. 2023. "Sparks of Artificial General Intelligence: Early Experiments with GPT-4." *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.12712>.
3. Cazzaniga, M., Jaumotte F., Li L., Melina G., Panton A. J., Pizzinelli C., Rockall E. J., and M. Mendes Tavares. 2024. *Gen-AI: Artificial Intelligence and the Future of Work*. International Monetary Fund, Staff Discussion Notes No. 2024/001.
4. Goodfellow, I., Bengio Y., and A. Courville. 2016. *Deep Learning*. MIT Press.
5. Grand View Research. 2024. *Artificial Intelligence Market Size, Share & Trends Analysis Report by Solution, by Technology (Deep Learning, Machine Learning, NLP, Machine Vision, Generative AI), by Function, by End-Use, by Region, and Segment Forecasts, 2024 - 2030*.
6. Jumper, J., Evans R., Pritzel A., and et col. 2021. "Highly Accurate Protein Structure Prediction with AlphaFold." *Nature* 596: 583–89.
7. Lane, M., Williams M., and S. Broecke. 2023. "The Impact of AI on the Workplace: Main Findings from the OECD AI Surveys of Employers and Workers." Organization for Economic Cooperation; Development (OECD). Technical report 288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/ea0a-0fe1-en>.
8. Larson, E. K. 2021. *The Myth of Artificial Intelligence: Why Computers Can't Think the Way We Do*. Shackleton Books.
9. Leslie, D. 2020. "Understanding Bias in Facial Recognition Technologies: An Explainer." The Alan Turing Institute. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.4050457>.
10. López de Mántaras, R., and P. Meseguer González. 2017. *Inteligencia Artificial*. Los libros de la Catarata.
11. Maslej, N., Fattorini L., Perrault R., Parli V., Reuel A., Brynjolfsson E., Etchemendy J., et al. 2024. "The AI Index 2024 Annual Report." AI Index Steering Committee, Institute for Human-Centered AI, Stanford University.
12. Mittermaier, M., M. M. Raza, and J. C. Kvedar. 2023. "Bias in AI-Based Models for Medical Applications: Challenges and Mitigation Strategies." *NPJ Digit. Med.* 6 (113). <https://doi.org/10.1038/s41746-023-00858-z>.
13. Patterson, D., Gonzalez J., and Le Q. et col. 2021. "Carbon Emissions and Large Neural Network Training." <https://arxiv.org/abs/2104.10350>. <https://arxiv.org/abs/2104.10350>.
14. Russel, S., and P. Norvig. 2022. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 4th Ed. Pearson.



15. Silver, A. & Maddison, D. & Huang. 2016. "Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search." *Nature* 529 (7587): 484–89.
16. Sutton, R. S., and A. G. Barto. 1998. *Reinforcement Learning: An Introduction*. Bradford Books.
17. Tunyasuvunakool, K., Adler J., Wu Z., and et col. 2021. "Highly Accurate Protein Structure Prediction for the Human Proteome." *Nature* 596: 590–96.
18. Turing, A. M. 1950. "Computing Machinery and Intelligence." *Mind* 59 (236): 433–60.
19. Vries, A. de. 2023. "The Growing Energy Footprint of Artificial Intelligence." *Joule* 7: 2191–94.

---

**If you want to quote our article:**

Alonso Betanzos A. Navigating the Ethical and Societal Challenges of Artificial Intelligence: Ensuring Responsible Innovation. *RACSG*.2025;113(01):54-65.  
rac.2025.113.1.org04

## ORIGINAL

# MARTE: OBJETIVO GEOLÓGICO Y ASTROBIOLÓGICO Y PRIMER DESTINO PLANETARIO DE LA HUMANIDAD

## MARS: GEOLOGICAL AND ASTROBIOLOGICAL TARGET AND FIRST PLANETARY DESTINATION OF HUMANKIND

Jesús Martínez Frías<sup>1,2</sup>

1. Instituto de Geociencias, IGEO (CSIC-UCM)
2. Académico Numerario de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España

### RESUMEN

La humanidad se está abriendo al espacio en toda su dimensión interdisciplinar. La geología planetaria y astrobiología vienen demostrando, desde hace decenios, que son cruciales en este proceso. Marte es nuestro primer destino planetario y el planeta que, por primera vez, convertirá a la próxima generación en la primera generación interplanetaria. En este artículo se abordan algunas cuestiones candentes y actuales, donde ambos campos de conocimiento convergen en la investigación y exploración del planeta rojo y se contextualiza el papel de la geología planetaria, a distintos niveles, en las actuales hojas de ruta astrobiológicas, destacando su relevancia científica y académica.

**Palabras clave:** Marte; Geología planetaria; Astrobiología; Investigación; Humanidad.

### ABSTRACT

Humankind is opening up to space in its whole interdisciplinary dimension. Planetary geology and astrobiology have been demonstrating, for decades, that they are crucial in this process. Mars is our first planetary destination, and the planet that, for the first time, will make the next generation the first interplanetary generation. This article addresses some ongoing issues, where both fields of knowledge converge in the research and exploration of the Red Planet. Likewise, the role of planetary geology is contextualized, at different levels, in the currently-active astrobiological roadmaps, highlighting its scientific and academic relevance.

**Keywords:** Mars; Planetary geology; Astrobiology; Research; Humankind.

### Correspondencia

Jesús Martínez Frías

Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España

Calle Valverde, 22 · 28004 · Madrid, España

E-mail: secretaria@rac.es

### INTRODUCCIÓN

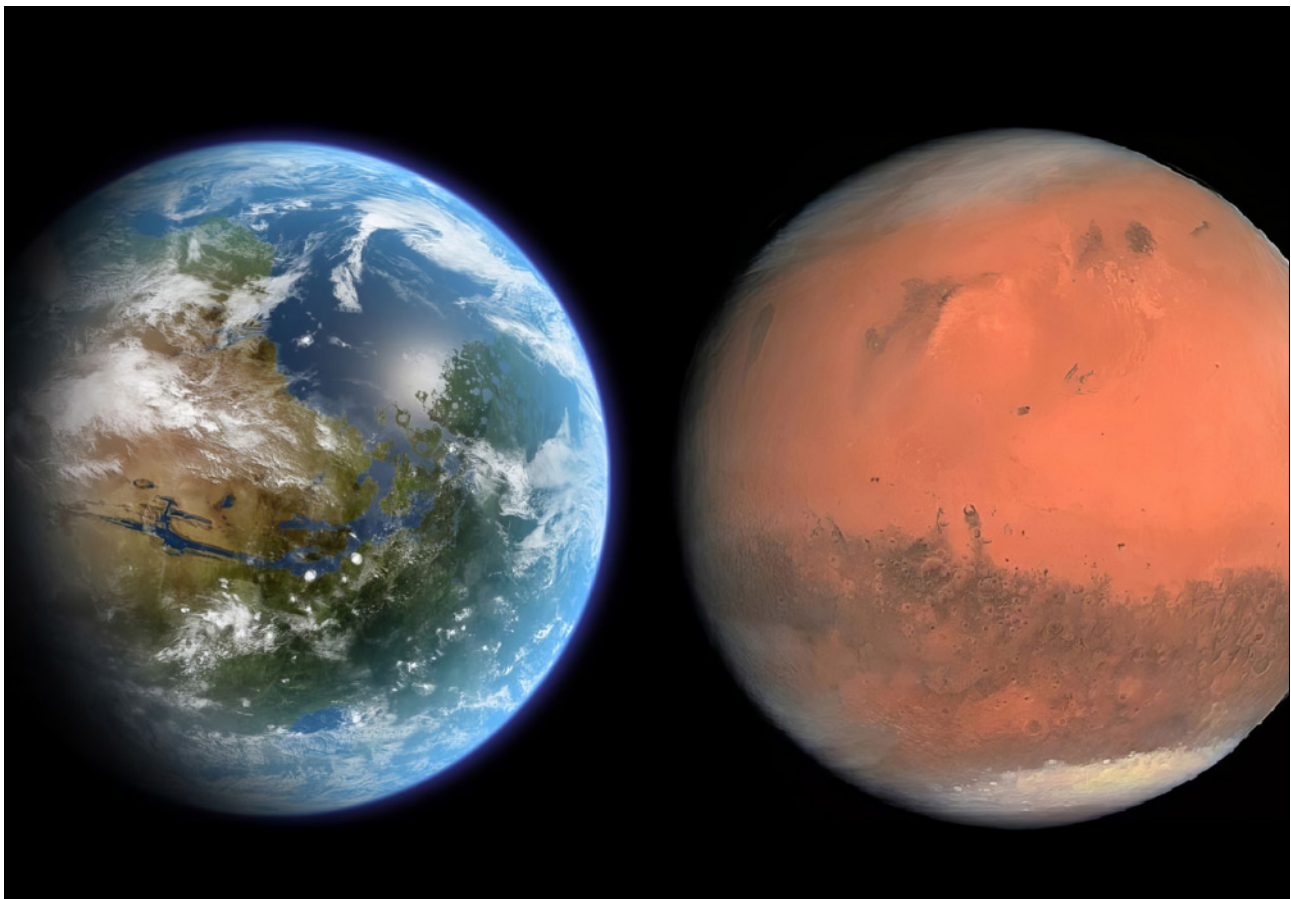
Marte siempre ha fascinado a la humanidad. Desde la mitología clásica (probablemente incluso mucho antes) a la ciencia, el planeta rojo, constituye un elemento más, que ejemplifica, nuestra curiosidad e interés ancestral por adentrarnos en los misterios del cosmos.

La geología planetaria nos viene permitiendo, desde hace decenios, contribuir a un mayor conocimiento del “planeta rojo”, su origen y evolución, recomponiendo el intrincado rompecabezas de su tremenda transformación paleoambiental (Martínez-Frías & Madero, 2004; Martínez-Frías et al., 2008; Martínez-Frías, 2009; USGS, 2023, Martínez-Frías, 2024). Marte ha sufrido una enorme transformación. En sus

primeras etapas evolutivas, hace miles de millones de años, el planeta ha pasado de tener un ambiente pasado húmedo, con una atmósfera más densa y rica que la actual y la existencia de agua líquida estable en su superficie (con ríos, lagos, torrentes e incluso un posible gigantesco océano en su hemisferio norte), a un Marte actual sin prácticamente actividad geodinámica, más yermo y sin apenas energía (Ehlmann et al. 2011; Matsubara et al. 2013; Ramirez y Craddock, 2018) (Fig.1). Obviamente, esto enlaza directamente con sus condiciones de habitabilidad, con la exploración de su cada vez más completo registro geológico y con la búsqueda de posibles biomarcadores en sus diferentes contextos geológicos, principalmente sedimentarios, aunque también hidrotermales.

ca sus objetivos científicos generales. Sin remontarnos a los Viking de los años 70 --y centrándonos en los últimos **rovers**, los MER (Mars Exploration Rover), el Curiosity (Mars Science Laboratory) y el Perseverance (Mars 2020) (Fig. 2)--, el hecho de poder contar con información cartográfica geológica, e interpretaciones de modelos paleoambientales de los sitios de aterrizaje constituye, sin duda, un factor crucial.

Sería pretencioso por mi parte abordar en esta contribución todo lo realizado en Marte en más de medio siglo de investigación y exploración, con misiones de diferentes países y agencias espaciales. Sin embargo, sí considero apropiado focalizar los **cuatro pilares** sobre los que se sustenta actualmente la misma, en el



**Figura 1.** Marte ha sufrido una evolución a lo largo de su historia planetaria, desde un Marte “húmedo” con la presencia de agua líquida en su superficie y una atmósfera más parecida a la de la Tierra y volcanes activos, hasta el Marte actual, que ha perdido su energía y vitalidad geológica. Imagen: Daein Ballard/ESA

Se puede decir que todas las misiones a Marte (TPS, 2003) tienen una directriz geológica previa, que mar-

ámbito de la geología planetaria y astrobiología (Martínez-Frías, 2015):

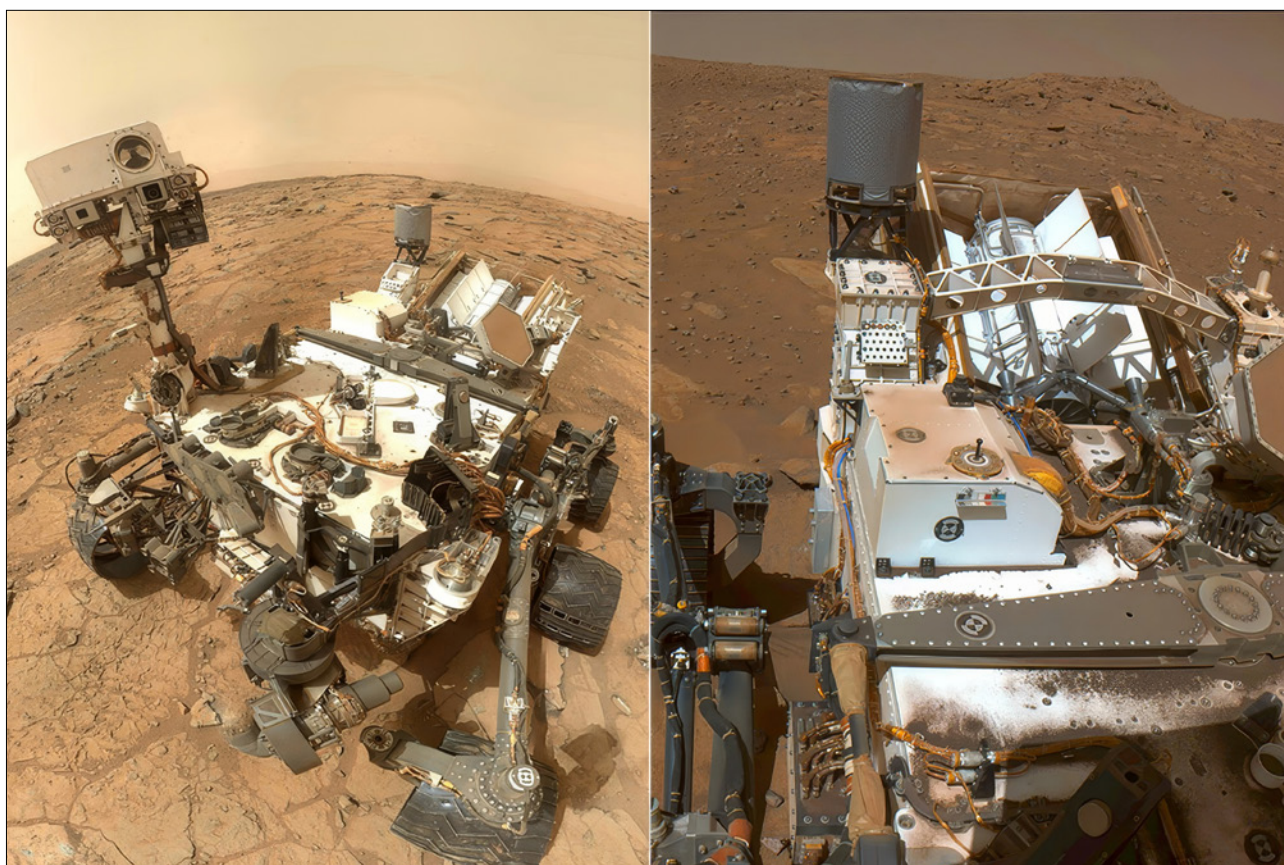


Figura 2. Fotografías reales en Marte de los rovers Curiosity (izquierda) y Perseverance (derecha). Misiones, NASA-MSL y NASA-Mars2020. Imágenes: NASA/JPL-Caltech/MSSS

- meteoritos de Marte;
- misiones a Marte, incluyendo orbitadores, aterrizadores (landers) y rovers (TPS, 2003);
- cámaras de simulación planetaria y
- análogos de Marte.

Estos cuatro pilares conceptuales, y también metodológicos, son los que nos permiten comprender mejor cómo ha sido su origen y evolución planetaria y también desarrollar nuevos modelos y establecer directrices científicas para futuras exploraciones. En síntesis, han contribuido, entre otros aspectos, a:

- conocer aspectos de Marte antes de enviar una misión, gracias a la información contenida en meteoritos marcianos, eyectados como consecuencia del impacto de enormes objetos (probablemente asteroidales) contra su superficie;
- realizar ensayos termodinámicos sobre simulantes y rocas marcianas, analizando su composición y alteraciones de manera controlada en las cámaras de Marte (Muñoz-Caro et al., 2006a). Algunos de estos ensayos tienen una importancia astrobiológica crucial, ya que engarzan con cuestiones ligadas a la habitabilidad superficial y subsuperficial y
- establecer determinadas zonas de la Tierra, llamadas análogos de Marte (Muñoz-Aragón et al., 2017; Léviellé, 2023), que se vienen utilizando como laboratorios naturales para la prueba de prototipos de ingeniería y el uso de espectrómetros portátiles similares a los que llevarán los **rovers**, validar modelos mineralógicos y geoquímicos, seleccionar estándares a efectos de comparaciones sobre mineralogía y petrología interplanetaria, entrenar astronautas sobre geología planetaria y astrobiología, etc.



En este artículo se abordarán algunos de estos aspectos, intentando: 1) contextualizar el conocimiento actual sobre el planeta rojo en el marco de la evolución histórica de su exploración e investigación; 2) definir cuáles son, hasta el momento, las zonas más interesantes o candentes, cuya geología marca la presencia en ellas de misiones y concretamente **rovers** y 3) establecer cómo han variado los objetivos científicos, en paralelo al mayor y mejor conocimiento geológico del planeta y, desde el punto de vista astrobiológico, compartiendo el interés por la búsqueda de huellas de vida pasada o presente con el de la futura habitabilidad humana.

### ALGUNAS CUESTIONES GEOLÓGICAS Y ASTROBIOLÓGICAS EN RELACIÓN CON MARTE

En la actualidad nos podemos hacer algunas preguntas interesantes desde el punto de vista geológico y astrobiológico acerca del planeta rojo:

- ¿Cuáles son actualmente los motivos para explorar geológicamente Marte?
- ¿Qué nos ha aportado y nos aporta la comprensión de la geología terrestre enfocándola como geología planetaria?
- ¿Podríamos encontrar biomarcadores de vida pasada en minerales, sedimentos y rocas de Marte gracias a los estudios geológicos?
- ¿Qué supone la evolución secuencial de objetivos científicos, en el contexto de la transformación sufrida por Marte en el ámbito de su habitabilidad?
- ¿Cuáles están siendo los resultados de los orbitadores y los **rovers** desde una directriz geológica de sus actividades y rutas?
- ¿De qué manera desde la Tierra podemos también complementar los datos de las misiones a Marte?

La contestación a estas cuestiones, que irá desgranándose más adelante, es crucial para comprender las estrategias de investigación actualmente en desarrollo.

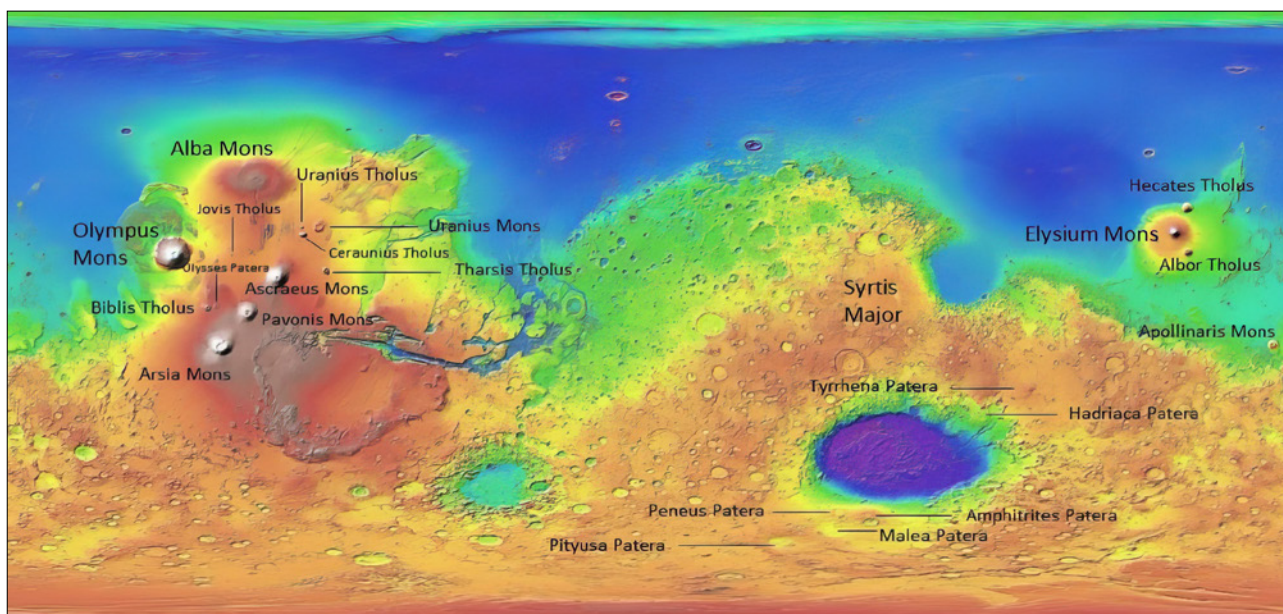
Marte forma parte de los denominados planetas terrestres o telúricos. Es decir, que estudiando Marte avanzamos no solo en el conocimiento sobre su origen y evolución, sino también en el del propio contexto planetario del que forma parte la Tierra, como también Venus y Mercurio (la Luna tuvo un origen posterior).

No debemos olvidar que nuestro planeta posee una importante energía interna y actividad geodinámica, interna y externa, que ha hecho que queden solo retazos de los materiales y procesos más prístinos. Es decir, no existen apenas lugares en la Tierra donde se preserven las propiedades originales de lo que ocurrió hace más de 4500 millones de años. El estudio geológico de Marte, junto con el de los meteoritos asteroidales más primitivos e indiferenciados (las condritas, Muñoz-Caro & Martínez-Frías, 2006) está siendo fundamental para comprender mejor los orígenes de la Tierra y de la vida.

Además, existe, otro motivo de gran relevancia para explorar geológicamente Marte: la planetología comparada Tierra-Marte nos permite desarrollar modelos evolutivos comparativos acerca de los cambios globales, tanto desde el punto de vista litosférico como atmosférico. En este sentido, sabemos que Marte ha sufrido una tremenda transformación geológica, ambiental y climática (básicamente, su parón geodinámico, pérdida del agua líquida y su cambio hacia un modelo global marciano de mayor aridez) (Hartmann et al. 2001), de la que podemos y debemos aprender para el futuro de la sostenibilidad de la Tierra y la vida.

La geología terrestre extrapolada a la geología planetaria es la que nos está proporcionando las claves para desentrañar los procesos ocurridos en el planeta rojo a lo largo de su registro geológico y paleoambiental. Entre todos ellos, el volcanismo ha sido de especial relevancia, por su extensión al conjunto del planeta (Fig.3).

Los principios geológicos identificados en la Tierra, válidos para establecer marcos geodinámicos, mineralogénicos, geofísicos y geoquímicos a diferentes escalas, pueden extrapolarse a Marte y al resto de planetas de tipo rocoso (en cierto modo también a las lunas heladas), en las que el hielo es el mineral o la roca principal que forma parte de sus cortezas y mantos.



**Figura 3.** Mapa topográfico de Marte, donde se muestra la denominada “dicotomía litosférica” de sus dos hemisferios y algunos de sus principales volcanes. Imagen: ASA/USGS/USGS Astrogeology Center/Secosky

En relación con la tercera cuestión sobre los biomarcadores, planteada previamente, es gracias a la geología planetaria que:

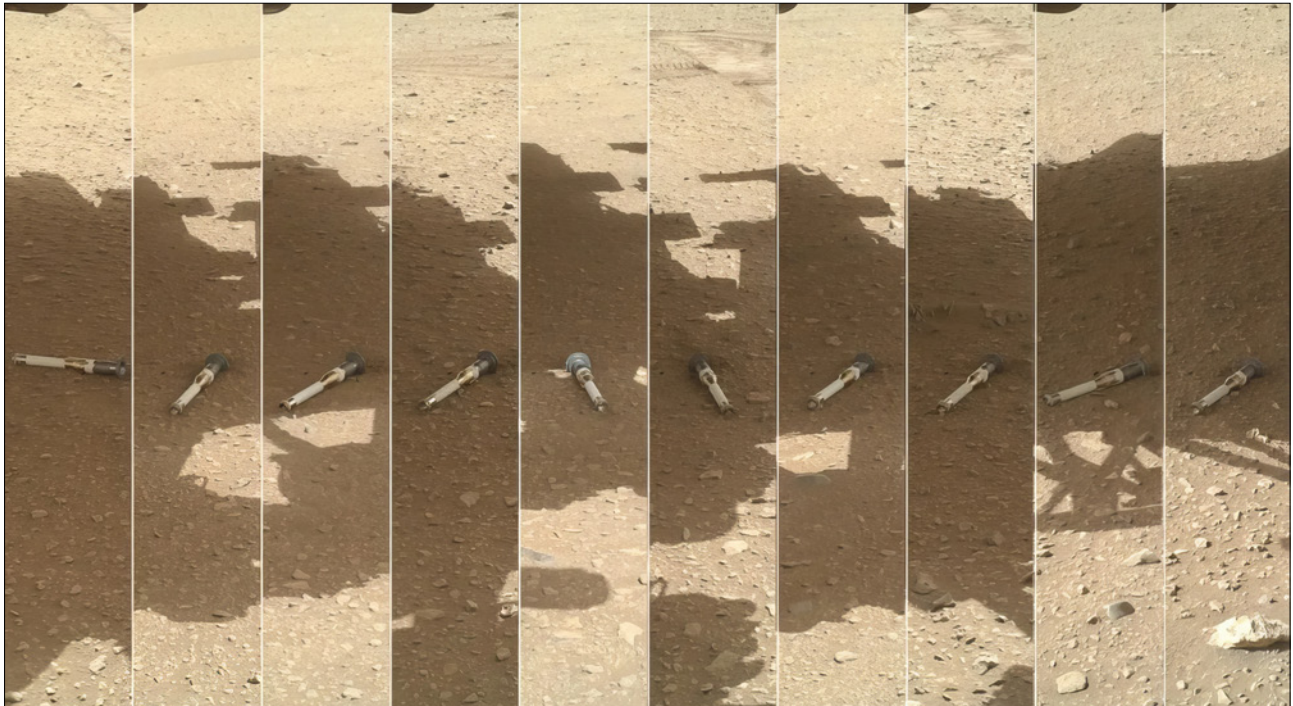
- se están identificando los paleoambientes más apropiados para su preservación, considerando las condiciones hostiles para la vida de la superficie del planeta;
- se está evaluando y comprobando experimentalmente el papel de las arcillas y de los ambientes sedimentarios “de baja energía”, como facilitadores de la conservación de posibles biofirmas de vida pasada, si es que existió y
- se está analizando cómo los minerales y el polvo regolítico basáltico constituyen elementos de protección frente a la actual radiación UV marciana (entre 200-400 nm) (Muñoz-Caro et al., 2006). Mediante experimentos mineralógicos realizados en las cámaras de simulación de ambientes planetarios, se ha comprobado que con tan solo 300 micras de polvo volcánico basáltico, o con 1 mm de jarosita o yeso es suficiente (Martínez-Frías et al. 2006) para que una supuesta colonia microbiana que habite a esa escasa distancia de la superficie, pueda estar resguardada de dicha radiación UV.

Con respecto a la evolución secuencial de los objetivos científicos, existe un tránsito –realmente un salto tecnológico-- desde las antiguas misiones de los MER (“Mars Exploration Rover”) a las actuales y futuras del Curiosity, Perseverance y la Mars Sample Return (y otras en desarrollo). Esta evolución ha pasado por tres etapas esenciales (Green, 2014):

- la búsqueda de ambientes habitables;
- la exploración de huellas de vida pasada o presente (biomarcadores);
- la caracterización de las condiciones de habitabilidad para futuras misiones tripuladas. Hay que tener en cuenta que estas etapas no son incompatibles ni excluyentes entre sí, pero sí describen, de forma general, los objetivos esenciales del último cuarto de siglo de exploración del planeta rojo. En el propio **rover** Perseverance ya se detecta esta evolución con un instrumento, el MOXIE (“Mars OXygen In situ resource utilization Experiment”) que está generando oxígeno a partir del CO<sub>2</sub> mayoritario de la atmósfera de Marte, ligado directamente a la futura habitabilidad humana (Hecht et al. 2024), o en las cápsulas cilíndricas en las que estamos incorporando muestras que vendrán a la Tierra para su investigación detallada a través de la futura misión de recuperación de muestras de la NASA “Mars Sample Return” (Fig. 4).

Como se expondrá más adelante, ambos aspectos relacionados con la habitabilidad de microorganismos y de humanos forman parte de la hoja de ruta de NASA ("NASA Astrobiology Roadmap") que en un principio estaba más enfocado a la vida microbiana y sus biomarcadores.

nes, que dan lugar a estructuras impactogénicas de decenas e incluso cientos de km de diámetro, también producen la movilización de fluidos atrapados en las rocas, propiciando una actividad geodinámica que origina nuevos procesos y contribuye a la creación de nichos con agua líquida, donde la vida podría emerger.



**Figura 4. Combinación de imágenes tomadas mostrando los tubos de muestras "in situ" en Marte, tras ser depositados sobre el suelo marciano por el rover Perseverance. En el futuro serán recuperados por la misión Mars Sample Return. Imagen: NASA/JPL-CALTECH/MSSS**

Siguiendo el esquema planteado, los resultados que están obteniendo los orbitadores (que realizan estudios geológicos desde la órbita marciana) y los **rovers**, principalmente los MER (Spirit y Opportunity), Curiosity y Perseverance, evidencian la importancia de la geología planetaria en sus objetivos y definición de rutas. No es casual que Opportunity, Curiosity y Perseverance hayan aterrizado en grandes cráteres de impacto: Gusev, Gale y Jezero, respectivamente (Green & Cabrol, 1997; Barlow, 2010; Robbins & Haynek, 2012). Geológicamente, este tipo de cráteres son, por distintas razones, zonas muy relevantes de exploración geológica y astrobiológica: a) gracias al desmantelamiento generado por el impacto, permiten investigar bajo la superficie marciana, tanto materiales y procesos geológicos y b) las altas condiciones de presión y temperatura originadas por estas colisio-

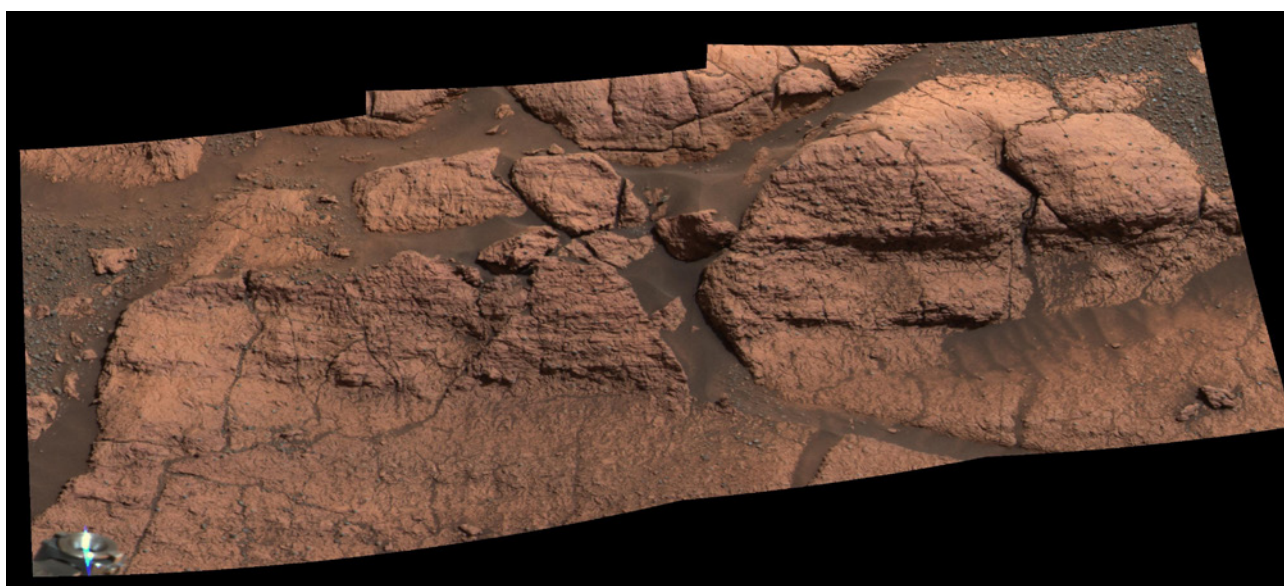
Tanto en Gusev como en Gale y Jezero, se identificaron antiguos lagos (Mangold et al. 2021; Losa-Adams et al. 2021; Goldspiel, 2023). Cada uno de ellos posee características geológicas adicionales, más allá de los cráteres en sí mismos, que los ejemplifican como zonas de exploración planetaria y búsqueda de vida (minerales de la arcilla, ópalo, carbonatos, delta, cambios en la escorrentía superficial, materiales correspondientes al Marte antiguo acuoso, etc.).

El **rover** Opportunity, gemelo del Spirit que aterrizó en el cráter Gusev, tuvo como objetivo geológico el estudio de la zona de Meridiani Planum. Y lo hizo guiado por la presencia de un mineral (la hematites). Estudios previos habían confirmado el origen hidrotermal de este óxido de hierro, lo que conllevaba explorar otra región marciana relacionada con el agua, pero en un

contexto diferente al lacustre. Además, en esta zona, el *rover* Opportunity descubrió la jarosita (Klingelhofer et al. 2004), importantísima por ser un mineral que requiere agua líquida para formarse, siendo, por tanto, un geoindicador de habitabilidad. Una anécdota interesante para España es que la jarosita fue descubierta y definida en nuestro país a nivel mundial en el Barranco del Jaroso, Sierra Almagrera, Almería (Martínez Frías et al. 2004), constituyendo esta zona por ello la Localidad Tipo Mundial y un análogo de Marte de primer nivel, en relación con este tipo de ambientes (Fig.5).

#### CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN GEOLÓGICA DE MARTE EN LAS HOJAS DE RUTA ASTROBIOLÓGICAS

Una vez descritas las cuestiones geológicas y astrobiológicas más candentes en relación con el planeta rojo, parece procedente detallar cómo todo ello encaja en las hojas de ruta astrobiológicas. Para ello, un primer análisis lleva a trasladar los aspectos esenciales y generales de dichos *roadmaps* a los específicos



**Figura 5.** Mosaico de imágenes tomado por la cámara del “Mars Exploration Rover”-Opportunity correspondiente al afloramiento marciano de “El Capitán”, donde se detectó la presencia de jarosita. Imagen: NASA.

Por último, desde la Tierra, podemos complementar la investigación de Marte, como se ha indicado en un principio, a través de los meteoritos de Marte y las cámaras de simulación planetaria y, sobre todo, gracias a los denominados análogos de Marte. En España tenemos una gran geodiversidad y riqueza geológica, que nos permite disponer de extraordinarios análogos que vienen utilizándose como laboratorios naturales, tales como Río Tinto, el Jaroso, Canarias, principalmente Lanzarote y Tenerife (Fig. 6), el Golfo de Cádiz y la región volcánica de Calatrava (Ciudad Real), entre otros (Martínez-Frías et al. 2017). Cada uno de ellos contribuye, como si se tratara de las piezas de un rompecabezas, a abordar distintos aspectos de la geodiversidad de Marte y a comprender muchos de los procesos geológicos allí ocurridos, así como a establecer criterios para definir zonas de habitabilidad e importancia astrobiológica.

relacionados con Marte. Básicamente son dos grandes hojas de ruta, de la NASA y la ESA, que comparten en lo esencial objetivos y metodologías similares (Des Marais et al., 2003; Hornek et al. 2016). El primero (“NASA Astrobiology Institute”) fue el pionero y, además, el que ha conllevado una importante evolución y actualización conceptual, durante estos últimos 22 años, que viene marcando las directrices globales.

El primer tema abordado en la hoja de ruta se refiere a cómo empezó y se desarrolló la vida. Los estudios que se vienen desarrollando en Marte son cruciales a efectos de establecer modelos de planetología comparada sobre la emergencia de la vida. Hasta el momento, la vida en la Tierra es la única que conocemos y el hallazgo de vida pasada o presente en el planeta



Figura 6. Dos zonas importantes de investigación en España como análogos de Marte, sobre geología planetaria y astrobiología: arriba, zona de los Azulejos del Teide (Tenerife); abajo: Parque Nacional de Timanfaya (Lanzarote), Islas Canarias. Lanzarote se viene utilizando además como zona de instrucción de astronautas de la ESA, NASA y JAXA.



o de sus posibles biofirmas, permitiría comprender si los principios metabólicos de la vida más primitiva, siguen o no los mismos esquemas. A ellos habría que unir también, en caso de que se detectara, cómo ha sido la coevolución biológica y geológica del ecosistema donde esta ha emergido.

La segunda cuestión se refiere a la posible existencia de vida más allá de la Tierra, con objeto de establecer sus límites termodinámicos y ambientales. Los estudios que se vienen desarrollando en Marte, en los que la geología planetaria constituye una disciplina esencial, ayudan a comprender qué es lo que hace que un planeta sea habitable y también nos facilita el reconocimiento de biofirmas, estableciendo diferencias entre geo y biomarcadores (Martínez Frías et al. 2007). Asimismo, si la vida en Marte emergió en su época de pasado acuoso y ya no existe, también contribuye a comprender sus causas y condicionantes (presión atmosférica, radiación, temperatura, etc).

El tercer punto se centra en el futuro de la vida en la Tierra y más allá. Aquí son dos los aspectos principales en los que la geología planetaria engarza con la astrobiología. El primero se centra en los aspectos relacionados con la búsqueda de vida en Marte (y otros cuerpos planetarios). El segundo se focaliza en todas las complejas variables relacionadas con las futuras misiones tripuladas. Para esto último, la geología planetaria también posee una importancia crucial en el ámbito de la habitabilidad per se y en la utilización de los denominados ISRU ("in situ resource utilization"). Solamente con un buen conocimiento geológico de las diferentes zonas Marte se podrá garantizar la habitabilidad de las futuras misiones tripuladas.

## CONSIDERACIONES FINALES

La vida no ha dejado de conquistar otros ambientes desde que apareció en la Tierra, hace casi 4000 millones de años. Se ha extendido de los mares y océanos a los continentes y de éstos a la atmósfera. La humanidad continúa este proceso hacia el espacio y nosotros, nuestra generación, está siendo testigo de ello. Somos la generación que está viviendo los primeros pasos científicos, tecnológicos y socio-culturales que está dando el ser humano de la Tierra al Espacio, con todo lo que ello conlleva como desafío presente y futuro.

El espacio es un crisol interdisciplinar y también sociocultural. Estamos siendo conscientes de que la exploración y nuestra migración hacia el cosmos requieren visiones y acciones coordinadas, que comportan una imprescindible cooperación internacional. Una cooperación que puede generar sinergias, incluso más allá de lo esperado, propiciando una nueva percepción de nuestro planeta como un todo.

Hace tan solo 6 años, se cumplía el 50º Aniversario del primer alunizaje (Dunbar, 2024) protagonizado por Neil Armstrong, Edwin (Buzz) Aldrin y Michael Collins. A ellos, en el marco del programa Apolo, les siguieron otros 9 astronautas en un total de 11 misiones tripuladas a nuestro satélite, que completaron 367 órbitas alrededor de la Luna, 6 alunizajes y un tiempo total de permanencia allí de 81 horas y 5 minutos. La última misión tripulada (Apolo 17) se remonta a 1972. Tras todas ellas, ha habido muchas más, aunque sin presencia humana, desarrolladas por numerosos países. El programa Artemisa (Williams, 2024), en sus distintas fases (Fig.6), aborda estas cuestiones y continúa todo lo realizado hace ya medio siglo en las misiones Apolo y las sucesivas misiones robóticas enviadas por diferentes países; pero esta vez se centra en la Luna como objetivo táctico y en Marte como objetivo estratégico. El programa, aunque con algún retraso, ya está en desarrollo y se están obteniendo resultados espectaculares.

2021 se definió como el "Año de Marte", con la llegada casi simultánea de tres misiones de países tan distantes como EEUU (NASA/Mars2020), China (Tianwen1) y Emiratos Árabes Unidos (HOPE). Como se ha descrito previamente, la Geología Planetaria ha demostrado -y está demostrando- ser decisiva para comprender el origen y los procesos de evolución de planetas, lunas, asteroides y, desde el punto de vista astrobiológico, para determinar las claves científicas de búsqueda de vida extraterrestre y también para nuestra futura migración al espacio. Ello constituye un signo inequívoco del cambio de paradigma en el que estamos inmersos y que, estoy convencido, marcará socioculturalmente a las próximas generaciones. Marte es el primer destino planetario de la humanidad en su salida al espacio; el planeta que, por primera vez, convertirá a la próxima generación (tal vez incluso a la ya existente) en la primera generación interplanetaria (Martínez-Frías, 2024). Un desafío científico y tecnológico en el que tanto la geología planetaria como la astrobiología están actuando como puntas de lanza interdisciplinares para la futura habitabilidad en el espacio. Esto requerirá,



Figura 7. La nave Orión, la Tierra y la Luna capturadas durante la primera fase del programa Artemisa. Imagen: NASA.

como ya está ocurriendo, la cooperación internacional de las grandes agencias espaciales y también de algunos agentes privados. Es de esperar que estas sinergias fomenten la visión global de nuestro planeta como nuestra casa común, y que contribuya también a su sostenibilidad y a su protección.

#### CONFLICTO DE INTERESES

El autor/a de este artículo declara no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Barlow, N.G. (2010) What we know about Mars from its impact craters GSA Bulletin; May/June 2010; v. 122; no. 5/6; p. 644–657; doi: 10.1130/B30182.1
2. Des Marais DJ, Allamandola LJ, Benner SA, Boss AP, Deamer D, Falkowski PG, Farmer JD, Hedges SB, Jakosky BM, Knoll AH, Liskowsky DR, Meadows VS, Meyer MA, Pilcher CB, Nealson KH, Spormann AM, Trent JD, Turner WW, Woolf NJ, Yorke HW. T. (2003) The NASA Astrobiology Roadmap. Astrobiology. 3(2):219-35. doi: 10.1089/153110703769016299. PMID: 14577870.



3. Dunbar, B. (2024) Apollo 50th <https://www.nasa.gov/specials/apollo50th/>
4. Ehlmann, B., Mustard, J., Murchie, S. et al. (2011) Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars. *Nature* 479, 53–60. <https://doi.org/10.1038/nature10582>
5. Goldspiel, J.M. (2023). Mars, Paleolakes. In: Gargaud, M., et al. *Encyclopedia of Astrobiology*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-65093-6\\_5600](https://doi.org/10.1007/978-3-662-65093-6_5600)
6. Green, J. (2014) A Checkup on Future Mars Missions. Future Planetary exploration <https://futureplanets.blogspot.com/2014/06/a-checkup-on-future-mars-missions.html>
7. Green, E.A. & Cabrol, N.A. (1997) Limnologic Analysis of Gusev Crater Paleolake, Mars. *Icarus* Volume 130, Issue 2, December 1997, Pages 461-474
8. Hartmann, William & Neukum, Gerhard. (2001). Chronology and Evolution of Mars. *Space Science Reviews - Space Sci Rev.* 96. 165-194. [10.1023/A:1011945222010](https://doi.org/10.1023/A:1011945222010).
9. Hecht, M.H., Hoffman, J.A & Steen, P. (2024) Summary report on the Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE) Tenth International Conference on Mars 2024 (LPI Contrib. No. 3007) 3057.pdf <https://www.hou.usra.edu/meetings/tenthmars2024/pdf/3057.pdf>
10. Horneck G, Walter N, Westall F, Grenfell JL, Martin WF, Gomez F, Leuko S, Lee N, Onofri S, Tsiganis K, Saladino R, Pilat-Lohinger E, Palomba E, Harrison J, Rull F, Muller C, Strazzulla G, Brucato JR, Rettberg P, Capria MT. AstRoMap European Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*. 2016 Mar;16(3):201-43. doi: 10.1089/ast.2015.1441. PMID: 27003862; PMCID: PMC4834528.
11. Klingelhöfer G, Morris RV, Bernhardt B, Schröder C, Rodionov DS, de Souza PA Jr, Yen A, Gellert R, Evlanov EN, Zubkov B, Foh J, Bonnes U, Kankeleit E, Gütlisch P, Ming DW, Renz F, Wdowiak T, Squyres SW y Arvidson RE. (2004) Jarosite and hematite at Meridiani Planum from Opportunity's Mossbauer Spectrometer. *Science*. 2004 Dec 3;306(5702):1740-5. doi: 10.1126/science.1104653. PMID: 15576610.
12. Lévêillé, R. (2023). Mars Analogue Sites. In: Gargaud, M., et al. *Encyclopedia of Astrobiology*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-65093-6\\_939](https://doi.org/10.1007/978-3-662-65093-6_939).
13. Losa-Adams, E., Gil-Lozano, C., Fairén, A.G. et al. Long-lasting habitable periods in Gale crater constrained by glauconitic clays. *Nat Astron* 5, 936–942 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01397-x>
14. Mangold, N.; Gupta, S. ; Gasnault, O. ; Dromart, G. ; Tarnas, J. D. ; Sholes, S. F.; Horgan, B.; Quantin-Nataf, C. ; Brown, A. J. ; Mouélic, S. Le ; Yingst, R. A.; Bell, J. F. ; Beyssac, O. ; Bosak, T. ; Calef, F. ; Ehlmann, B. L. ; Farley, K. A.; Grotzinger, J. P.; Hickman-Lewis, K. ; Holm-Alwmark, S. LU ; Kah, L. C.; Martinez-Frias, J.; McLennan, S. M. ; Maurice, S. ; Nuñez, J. I. ; Ollila, A. M.; Pilleri, P. ; Rice, J. W. ; Rice, M. ; Simon, J. I. ; Shuster, D. L. ; Stack, K. M.; Sun, V. Z. ; Treiman, A. H. ; Weiss, B. P. ; Wiens, R. C. ; Williams, A. J.; Williams, N. R. y Williford, K. H. (2021) Perseverance rover reveals an ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars. *Science*, 374, 6568: 711- 717.
15. Martínez-Frías, J. y Madero, J. (2004) (Eds) *Meteoritos y Geología Planetaria*. Diputación Provincial de Cuenca, Ediciones Provinciales nº 23, 305p.
16. Martínez-Frías, J., Lunar, R., Rodríguez-Losada, J.A. y Delgado, A. (2004) "The volcanism-related multistage hydrothermal system of El Jaroso (SE Spain): Implications for the exploration of Mars Earth, Planets and Space 56: 5-8.
17. Martinez-Frias, J., Amaral, G. y Vázquez, L. (2006). Astrobiological significance of minerals on Mars surface environment. In: Amils, R., Ellis-Evans, C., Hinghofer-Szalkay, H. (eds) *Life in Extreme Environments*. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6285-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6285-8_4)
18. Martinez-Frias, J., Lázaro, E. y Esteve-Núñez, A. (2007a) Geomarkers versus Biomarkers: Paleoenvironmental and Astrobiological Significance, *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 36(5), 425-426
19. Martínez Frías, J. (2009) El geólogo planetario o astrogeólogo. En: *La profesión de geólogo*. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, ISBN: 978-84-9200-978-7, 201-218.



20. Martínez-Frías, J. (2015) Search for Life on Mars: an astrogeological approach. In: Kolb, V. (Ed.) *Astrobiology: An Evolutionary Approach*. 301-323.
21. Martínez-Frías, J., Mateo-Mederos, M<sup>a</sup> E. y Lunar, R. (2017) The scientific and educational significance of geoparks as planetary analogues: the example of Lanzarote and Chinijo Islands UNESCO Global Geopark. *Episodes* 40-4:343-347.
22. Martínez-Frías, J. (2024) *Geología Planetaria. La importancia de los análogos terrestres en la investigación paleoambiental y astrobiológica de Marte*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España. ISBN: 978-84-87125-86-7. 87p.
23. Matsubara, Y., Howard, A. D., y Gochenour, J. P. (2013) Hydrology of early Mars: Valleys network incision. *J. Geophys. Res.*, 118(6), 1365-1387.
24. Muñoz Aragón, L., García Baonza, V. y Martínez Frías, J. (2017) Geodiversidad y geociencias planetarias. Análogos de Marte en España. *Tierra y Tecnología*. <http://www.icog.es/TyT/index.php/2017/09/geodiversidad-y-geociencias-planetarias-analogos-de-marte-en-espana/>
25. Muñoz-Caro, G.M., Mateo-Martí, E. & Martínez-Frías, J. (2006) Near-UV transmittance of basalt dust as an analog of the Martian regolith: Implications for sensor calibration and astrobiology. *Sensors* 6:688-696.
26. Muñoz-Caro, G. & Martínez-Frías, J. (2006) Carbonaceous Dust in Planetary Systems: Origin and Astrobiological Significance. In Krüger, H. & Graps, A. (Eds), *Dust in Planetary Systems*, ESA/SP 643, 133-138.
27. Ramírez, R.M. y Craddock, R. (2018) The geological and climatological case for a warmer and wetter early Mars *Nature Geoscience* 11(4):230.
28. Robbins, S. J., and B. M. Hynek (2012), A new global database of Mars impact craters  $\geq 1$  km: 2. Global crater properties and regional variations of the simple-to-complex transition diameter, *J. Geophys. Res.*, 117, E06001, doi:10.1029/2011JE003967.
29. TPS (2023a) <https://planetary.s3.amazonaws.com/web/assets/pictures/mars-exploration-family-portrait-v13.jpg>
30. USGS (2023) Astrogeology Science Center Home. U.S. Department of Interior | U.S. Geological Survey <https://web.archive.org/web/20170706011251/https://astrogeology.usgs.gov/>
31. Williams, C. (2024) Artemis. The Lates ton Artemis. <https://www.nasa.gov/humans-in-space/artemis/#missions>

---

**Si desea citar nuestro artículo:**

Martínez Frías J. Marte: objetivo geológico y astrobiológico y primer destino planetario de la humanidad. *RACSG*.2025;113(01):66-77.  
rac.2025.113.1.org05

## ORIGINAL

# INGENIERÍA DE PROTEÍNAS: INNOVACIONES PARA BIOMEDICINA, BIOTECNOLOGÍA Y BIOELECTRÓNICA

## PROTEIN ENGINEERING: INNOVATIONS FOR BIOMEDICINE, BIOTECHNOLOGY, AND BIOELECTRONICS

**Laura Perez-Chirinos<sup>1#</sup>; Gabriela Guedes<sup>1#</sup>; Laura Saa<sup>1</sup>; Aitziber L. Cortajarena<sup>1,2</sup>**

1. Centro de Investigación Cooperativa en Biomateriales (CIC biomaGUNE), Donostia-San Sebastian, España.

2. Ikerbasque, Fundación Vasca para la Ciencia, Bilbao, España.

# Estos autores han contribuido por igual en este trabajo.

### RESUMEN

El diseño de proteínas para el desarrollo de sistemas con estructuras y funcionalidades específicas y novedosas ha aumentado notablemente durante los últimos años gracias al gran avance que han experimentado las técnicas computacionales y experimentales. Las proteínas, como bloques de construcción fundamentales en los seres vivos, ofrecen una enorme versatilidad para la ingeniería biomolecular. Su capacidad para adoptar estructuras diversas y llevar a cabo funciones específicas las convierte en herramientas esenciales para la creación de nuevos materiales y sistemas en biomedicina, biotecnología y bioelectrónica. En concreto, las proteínas de repetición son de gran interés por el elevado potencial que proporcionan al área de la ingeniería de proteínas y el diseño de materiales debido a su modularidad y gran robustez. En particular, la familia de proteínas consenso de repetición de tetratricopéptidos (CTPRs) ha sido ampliamente empleada en múltiples áreas de bionanotecnología debido a su capacidad inherente de autoensamblaje en sistemas macroscópicos, así como por su habilidad para estabilizar metales en el interior de su estructura de superhélice. En el presente artículo, se proponen las proteínas de repetición como sistemas ideales para el diseño de proteínas, destacando su capacidad como unidades estructurales y funcionales tanto para el desarrollo de materiales basados en el autoensamblaje como para servir de plantillas para la estabilización de nanopartículas metálicas, así como su uso como agentes de contraste, biocatalizadores, biosensores y en bioelectrónica.

**Palabras clave:** Diseño de proteínas; Proteínas modulares; Autoensamblaje; Biomateriales; Nanomateriales; Híbridos proteína-nanomaterial; Bioelectrónica.

### ABSTRACT

Protein design for the development of systems with specific and novel structures and functions has increased significantly in recent years, thanks to major advances in computational and experimental techniques. Proteins, as fundamental building blocks of living organisms, offer enormous versatility for biomolecular engineering. Their ability to adopt diverse structures and perform specific functions makes them essential tools for creating new materials and systems for applications in biomedicine, biotechnology, and bioelectronics. In particular, repeat proteins are of great interest due to the high potential they provide for protein engineering and materials design, due to their modularity and robustness. Among them, the family of consensus tetratricopeptide repeat proteins (CTPRs) has been widely used in multiple areas of bionanotechnology because of their inherent capacity for self-assembly into macroscopic systems, as well as their ability to stabilize functional nanomaterials within their structure. In this article, repeat proteins are presented as ideal systems for protein engineering, highlighting their potential as structural and functional units for the development of self-assembled materials, as templates for the stabilization of metal nanomaterials, and for applications such as contrast agents, biocatalysts, biosensors, and bioelectronics.

**Keywords:** Protein design; Modular proteins; Self-assembly; Biomaterials; Nanomaterials; Protein-nanomaterial hybrids; Bioelectronics.



## Correspondencia

Aitziber L. Cortajarena

Centro de Investigación Cooperativa en Biomateriales (CIC biomaGUNE), Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Parque Tecnológico de San Sebastian.

Paseo Miramón, 194 · 20014 · Donostia-San Sebastian, España.

E-mail: alcortajarena@cicbiomagune.es

## INTRODUCCIÓN

Las proteínas son las macromoléculas más abundantes en los seres vivos. Estas forman parte de la mayoría de los procesos esenciales de las células, jugando un papel fundamental en su supervivencia y sus funciones. La estructura de una proteína, formada por la interacción y plegamiento en el espacio tridimensional de una cadena lineal de aminoácidos, determina y regula su función en las células. Dado que existe una alta variabilidad en las posibles secuencias de aminoácidos y, por tanto, en las estructuras que puede adoptar, es posible diseñar proteínas con estructuras, propiedades y funcionalidades específicas completamente novedosas. Esta amplia versatilidad ha provocado un creciente interés durante las últimas décadas por el área de ingeniería y diseño de proteínas, debido al impacto que tiene tanto en la investigación fundamental de proteínas y bioquímica, como en su aplicación en biotecnología y biomedicina, entre otras.(Huang et al., 2016)

La predicción de la estructura tridimensional de las proteínas, basándose en la secuencia de aminoácidos, es uno de los mayores retos en el ámbito del diseño de proteínas. Sin embargo, durante los últimos años este campo ha experimentado avances notables impulsados por progresos tanto experimentales como computacionales. En primer lugar, el progreso de técnicas experimentales de alto rendimiento ha facilitado, por un lado, la resolución de un gran número de estructuras proteicas, acelerando el conocimiento sobre las relaciones secuencia-estructura-función en las proteínas. Por otro lado, ha permitido la generación y la evaluación de librerías extensas de proteínas diseñadas, fomentando el descubrimiento de proteínas con estructuras y funcionalidades novedosas. En segundo lugar, los métodos computacionales, alineados con el aumento de información experimental, han permitido tanto predicciones más precisas de estructuras y funciones, como aumentado el conocimiento de la relación secuencia/estructura. La sinergia de los enfoques experimental y computacional ha

permitido tanto el rediseño como el diseño *de novo* de proteínas y ensamblajes con funciones y estructuras personalizadas, abriendo nuevas oportunidades en investigación científica e industria.(Huang et al., 2016; Saven, 2010)

Durante los últimos años, los métodos computacionales han revolucionado la investigación en el área de diseño de proteínas gracias a la aparición de la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático. Existen distintos enfoques computacionales para la predicción de estructuras proteicas como los basados en aprendizaje automático (AlphaFold(Baek et al., 2021; Jumper et al., 2021) y RosettaFold(Baek et al., 2021)) , los métodos basados en algoritmos de Monte-Carlo (Rosetta), o los enfoques que utilizan cálculos de modelos físicos, como la mecánica cuántica (MQ) y la dinámica molecular (MD).(MacKerell et al., 1998; Park et al., 2016; Ponder & Case, 2003) La IA ha demostrado ser una herramienta especialmente transformadora para el avance en este campo por su excelente precisión en la predicción de estructuras. Este progreso ha sido tal que el Premio Nobel de Química en 2024 ha sido galardonado al Prof. David Baker, al Dr. Demis Hassabis y al Dr. John Jumper por "la predicción de la estructura de proteínas mediante el uso de inteligencia artificial". El Prof. David Baker ha sido galardonado con el Premio Nobel por el desarrollo del programa Rosetta, el cual permite la predicción de las estructuras conformacionales de las proteínas mediante la identificación de estados de baja energía. Una de las mayores aplicaciones de Rosetta ha sido el diseño de proteínas *de novo* mediante la optimización de la secuencia de aminoácidos para la obtención de una estructura definida.(Leman et al., 2020; Marcos & Silva, 2018) El Dr. Demis Hassabis y el Dr. John Jumper han sido galardonados con el Premio Nobel por el modelo de IA AlphaFold2, que está basado en el entrenamiento de una red neuronal para la predicción de la estructura de proteínas mediante el alineamiento múltiple de secuencias (MSA) y métodos de distancia entre pares usando la información disponible en el banco de datos de proteínas (PDB). (Jumper et al., 2021) Estas contribuciones han trans-

formado la forma en la que entendemos y diseñamos proteínas. Todas estas metodologías computacionales proporcionan herramientas poderosas para la predicción de estructuras proteicas, el diseño, y dinámica de proteínas, pudiendo complementarse para maximizar y optimizar los beneficios derivados de los distintos resultados de dichas técnicas. Aunque se han logrado grandes avances en el campo, sigue siendo un área de intensa investigación, debido a la alta complejidad de las relaciones secuencia-estructura-función en proteínas. La dificultad inherente a la predicción de las estructuras conformacionales en el espacio de las proteínas convierte el diseño racional de estas un desafío de gran relevancia científica. En este sentido, las proteínas basadas en módulos de repetición han sido ampliamente utilizadas como una estrategia eficiente, ya que su mayor simplicidad y versatilidad ayudan a reducir significativamente la complejidad del diseño y la predicción de sus estructuras tridimensionales.

La combinación de avances en técnicas experimentales y computacionales, junto con las ventajas que proporcionan las proteínas de repetición, ha permitido el desarrollo de materiales con morfología y funcionalidades específicas y novedosas. Además, estas proteínas se han integrado con nanomateriales, participando las proteínas como excelentes plantillas para la estabilización de nanomateriales metálicos. Estos nanomateriales han demostrado excelentes propiedades para su aplicación en ámbitos como la bioelectrónica,(Mejías et al., 2021) como agentes de contraste en imagen médica,(Aires, Maestro, et al., 2021) biosensores,(Aires et al., 2018; Romeo et al., 2021) y biocatálisis,(Donnelly et al., 2018; Watkins et al., 2017) entre otras aplicaciones. Además, estos biomateriales proteicos también destacan por su alta compatibilidad con sistemas biológicos, biodegradabilidad y sostenibilidad.

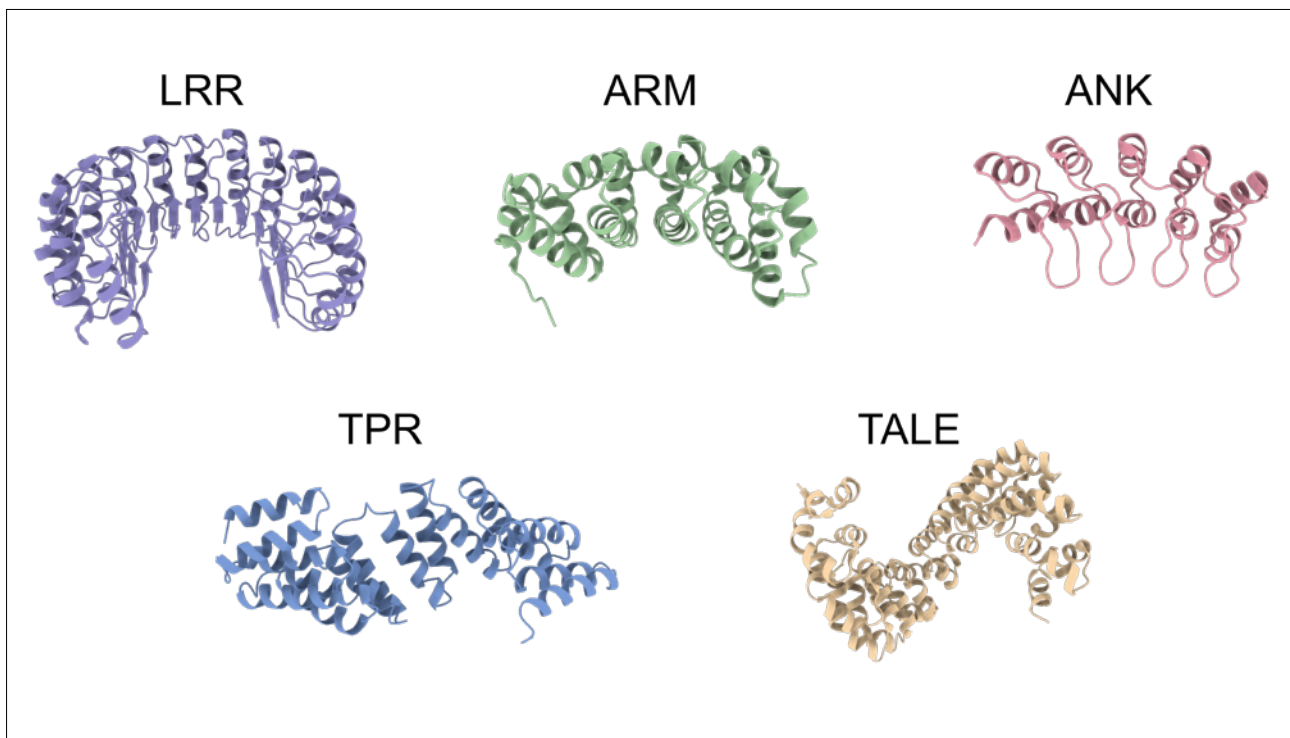
## PROTEÍNAS DE REPETICIÓN

Las proteínas de repetición son proteínas naturales normalmente involucradas en procesos de interacciones entre proteínas, que surgen de la duplicación en tándem de un motivo específico que es estructuralmente compatible consigo mismo por empalme o duplicación de genes.(Andrade et al., 2001) Cada repetición suele contener entre 18 y 47 aminoácidos, y sus estructuras se mantienen principalmente

mediante interacciones regulares y de corto alcance.(Boersma & Plu, 2011) La simplicidad de las proteínas de repetición permite comprender mejor las relaciones secuencia-estructura-función, en comparación con la mayoría de las proteínas, lo que hace que estas familias sean ideales como bloques para la ingeniería de proteínas. Las familias de proteínas de repetición más estudiadas son la repetición rica en leucina (LRR), la repetición armadillo (ARM), la repetición anquirina (ANK), la repetición de tetratricopéptidos (TPR) y la efectora de actividad similar a activador de transcripción (TALE) (Figura 1).

Dado que el tamaño y la morfología de las proteínas de repetición se pueden modular de manera relativamente sencilla, estas proteínas ofrecen oportunidades únicas para la ingeniería y diseño de bloques robustos con características deseadas. A diferencia de las proteínas globulares, las cuales forman contactos complejos de largo alcance, una característica clave de las proteínas de repetición es que cada módulo interacciona exclusivamente con los módulos vecinos, proporcionando una cooperatividad entre los distintos módulos que es responsable del plegamiento lineal característico de estas proteínas. Esta modularidad y cooperatividad reduce considerablemente la complejidad del rediseño y predicción de la estructura de dichas proteínas en comparación con las proteínas globulares. Esta característica permite insertar, eliminar o sustituir unidades de repetición sin alterar significativamente la estructura global, garantizando el mantenimiento de interfaces compatibles entre las unidades. El objetivo principal del diseño de proteínas de repetición es desarrollar sistemas modulares para diversas aplicaciones, centrándose en estructuras estables, homogéneas y modulares.

La ingeniería de estas proteínas se suele centrar en el rediseño de las secuencias consenso obtenidas mediante el análisis de secuencias de proteínas nativas y el diseño basado en estructuras. Las secuencias consenso se basan en el análisis estadístico mediante MSA, estudiando la conservación de los distintos aminoácidos entre las proteínas nativas. Como resultado, la secuencia consenso muestra el aminoácido más frecuente entre las proteínas naturales en cada posición.(Parmeggiani & Huang, 2017) El diseño por consenso ofrece dos ventajas clave frente al uso de una proteína específica de la familia. En primer lugar, la secuencia consenso suele tener significativamente mayor estabilidad al preservar las características estructurales que son inherentes a una familia na-



**Figura 1. Familias de proteínas de repetición. Nombre de la familia de proteínas de repetición y estructura de repeticiones en tándem. LRR (PDB ID:1A4Y). ARM (PDB ID: 4DB9). ANK (PDB ID: 2XEE). TPR (PDB ID: 2AVP). TALE (PDB ID: 4HPZ).**

tural, las cuales pueden perderse en proteínas que han evolucionado para realizar una función concreta. En segundo lugar, la secuencia consenso garantiza la compatibilidad entre repeticiones, ya que son todas idénticas, permitiendo la adición, eliminación e intercambio de repeticiones.(Boersma & Plu, 2011) Por estas razones, el diseño de una secuencia consenso de proteínas de repetición se ha realizado de forma efectiva en varias familias de proteínas de repetición, incluyendo ANK,(Binz et al., 2003) TPR,(Main et al., 2003) ARM,(Parmeggiani et al., 2008) LRR,(Lee et al., 2012) entre otras.(Coquille et al., 2014; Gully et al., 2015).

Entre las proteínas de repetición, la secuencia consenso de la familia de las proteínas de repetición tetratricopéptido (CTPR del inglés **Consensus tetratricopeptide repeat**), diseñada en el laboratorio de la Prof.<sup>a</sup> Regan, está en el punto de mira debido a su gran robustez y estabilidad. Las proteínas CTPR, provienen del motivo estructural TPR, el cual interviene normalmente en interacciones proteína-proteína en las células.(Main et al., 2003) El módulo individual se compone de una unidad estructural de hélice-giro-hélice, cuyo apilamiento en tándem (que

puede variar de 3 a 20 módulos) forma una estructura terciaria superhelicoidal (Figura 2).(Kajander et al., 2005) Esta unidad estructural está constituida por 34 aminoácidos, de los cuales sólo 8 están altamente conservados y son esenciales para garantizar el plegamiento adecuado.(Main et al., 2003) Esta robustez confiere una alta estabilidad estructural que permite la mutación de varios aminoácidos sin afectar a la estructura de la proteína, (Uribe et al., 2021) (Cortajarena et al., 2011) además de permitir la síntesis de nanomateriales metálicos en su estructura. (Aires, Maestro, et al., 2021) La naturaleza modular de estas proteínas también permite el ensamblaje de diferentes unidades de forma controlada (Kajander et al., 2007) y la fusión con otros módulos diana o terapéuticos.(Aires, Maestro, et al., 2021; Uribe et al., 2021) En conclusión, las proteínas CTPR son muy sencillas y altamente personalizables, ampliando enormemente el control de la síntesis y la versatilidad de los nanomateriales híbridos resultantes. Además, el diseño de estas proteínas podría llevar estos sistemas al siguiente nivel: el carácter modular de las proteínas CTPR permite la incorporación de moléculas diana y terapéuticas dentro del mismo andamiaje.

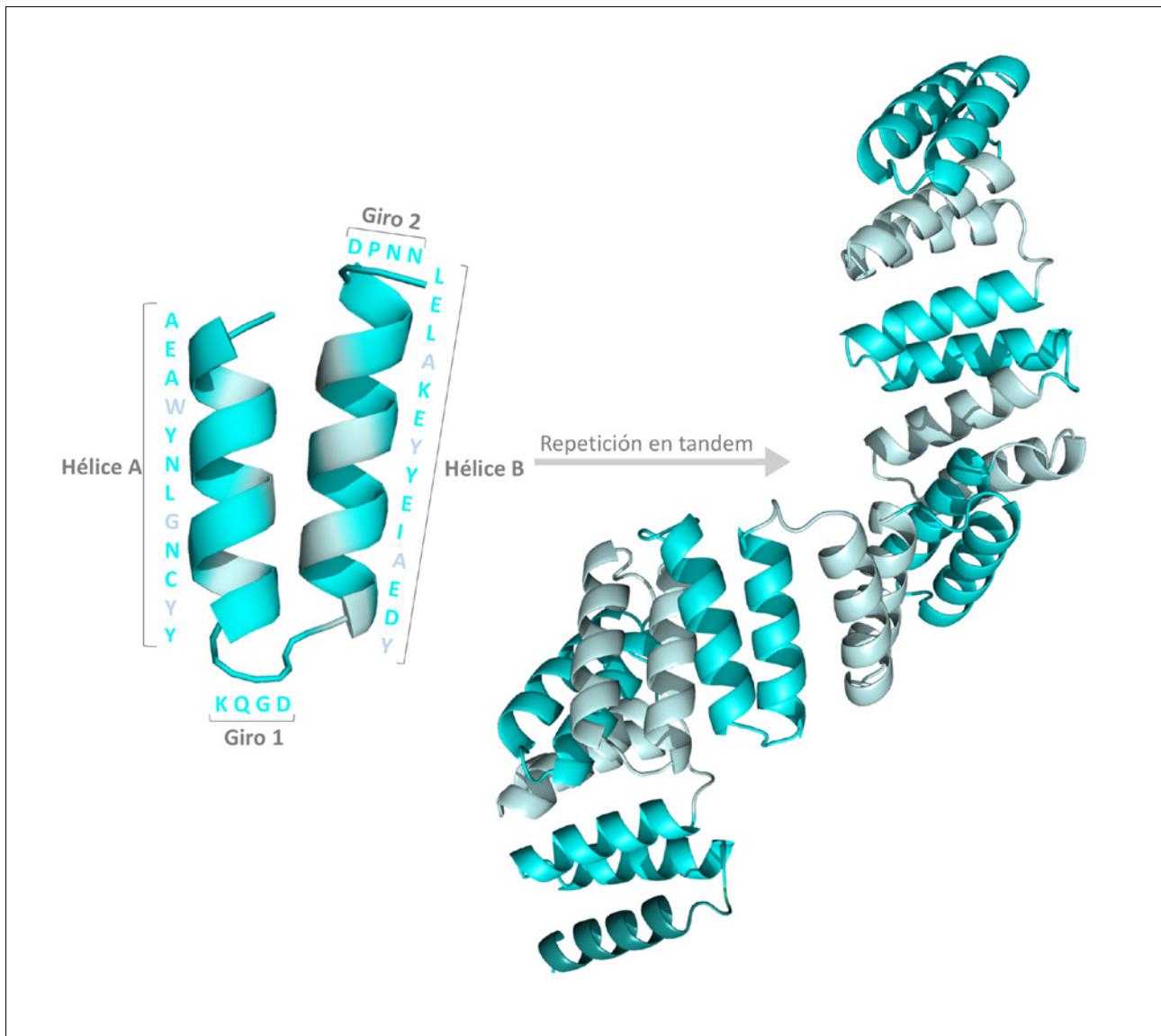


Figura 2. Estructura de la proteína CTPR. Modelo de la unidad estructural acompañado de su secuencia. Los aminoácidos conservados se muestran en azul más claro. La repetición en tándem del módulo individual CTPR (que puede variar de 3 a 20 módulos) origina una estructura terciaria de superhélice. Las diferentes repeticiones se resaltan en tonos azul y verde azulado. La hélice individual en el extremo C-terminal en color verde corresponde a la hélice de solvatación en el C-terminal la cual evita la exposición de aminoácidos hidrofóbicos a la superficie e incrementa la solubilidad de la proteína (PBD ID: 2HYZ).

## DISEÑO DE ENSAMBLAJES DE PROTEÍNAS

El autoensamblaje es un proceso espontáneo por el que unidades monoméricas de un mismo componente interactúan mediante interacciones no-covalentes para formar estructuras de mayor complejidad. En la naturaleza, las proteínas no solo

funcionan como componentes individuales en las células, sino que también son capaces de autoensamblarse para formar estructuras más complejas que normalmente se encuentran en la naturaleza como estructuras supramoleculares proteicas, como es el caso de la queratina, el colágeno, las capas S, o las cápsides víricas. Esta tendencia innata de las proteínas para autoensamblarse en estruc-



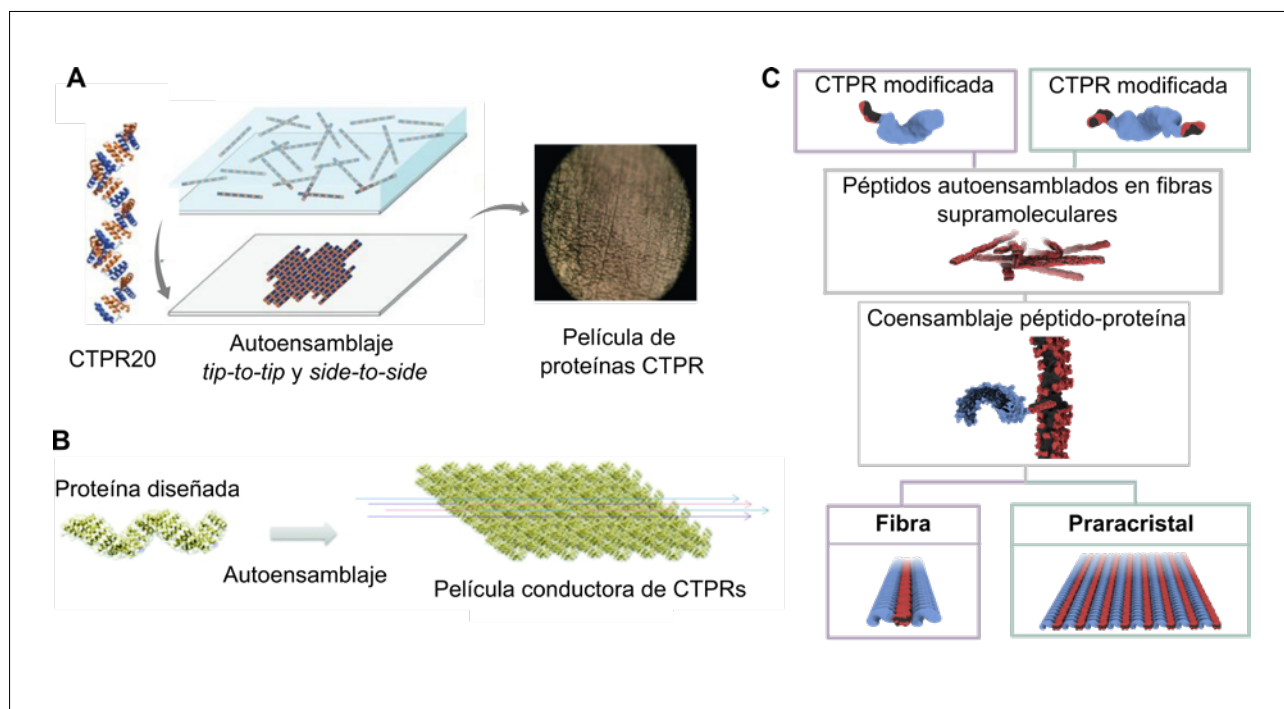
turas jerárquicas altamente ordenadas ha inspirado el uso de la ingeniería de proteínas para el desarrollo de estructuras supramoleculares autoensambladas.(Cortajarena & Grove, 2016; Whitesides et al., 1991)

El desarrollo de materiales basados en el autoensamblaje de proteínas presenta un reto adicional al autoensamblaje de moléculas pequeñas debido a que las proteínas son moléculas más complejas. Sin embargo, gracias a la estructura macromolecular de las proteínas, se pueden desarrollar materiales en los que es posible controlar mejor la geometría que con moléculas pequeñas. El ensamblado de proteínas en estos materiales puede inducirse mediante distintas estrategias. Uno de los enfoques más comunes es el diseño de interfaces hidrofóbicas para promover el ensamblaje de los componentes individuales, permitiendo controlar las interfaces de interacción entre las proteínas y, por ende, la geometría del material.(Tyka et al., 2011) Otros enfoques por los que se puede controlar la estabilidad y reproducibilidad de los ensamblajes incluyen: enlaces biotina-estreptavidina, enlaces disulfuro,(Mejías et al., 2014; Suzuki et al., 2016) interacciones mediadas por metales,(Suzuki et al., 2016) o enlaces asistidos por interacciones peptídicas. (Ferrari et al., 2012) El uso de estas estrategias ha permitido durante los últimos años el diseño y desarrollo de fibras,(Mejías et al., 2014; Phillips et al., 2012) cristales,(Ben-Sasson et al., 2021; Suzuki et al., 2016; Zhang et al., 2020) matrices, películas,(Carter & Grove, 2015; Grove et al., 2013; Mejías et al., 2021) y jaulas,(Divine et al., 2021) basadas en proteínas, que han presentado características prometedoras para el desarrollo de materiales bioactivos o incluso bioelectrónicos.(Lai et al., 2012)

Las proteínas de repetición son candidatas excepcionales para el desarrollo de materiales novedosos debido a su característica modularidad y estructura jerárquica. Especialmente, las proteínas CTPR presentan una tendencia de autoensamblaje intrínseca que ha permitido el desarrollo de materiales con una morfología controlada gracias a esta tendencia de autoorganización. Estas propiedades innatas de autoensamblaje están mediadas por interacciones axiales entre los extremos de las superhélices observadas en el empaquetamiento de los cristales,(Cortajarena et al., 2010; Kajander et al., 2007), películas sólidas,(Carter & Grove, 2015; Grove et al., 2013) y en solución,(Phillips

et al., 2012) así como por interacciones laterales entre superhélices también observadas en el empaquetamiento de cristales.(Cortajarena et al., 2010; Kajander et al., 2007)

Esta tendencia natural de autoensamblaje ha permitido el desarrollo de materiales basados en CTPRs con una morfología y propiedades físicas controladas.(Carter & Grove, 2015; Grove et al., 2013; Mejías et al., 2016) Un ejemplo de estos materiales se desarrolló en nuestro laboratorio, donde se crearon fibras nanométricas de CTPR formadas por su tendencia innata de interacción entre extremos de las superhélices. Además, la direccionalidad de las fibras y su autoensamblado fueron optimizados mediante la adición de cisteínas en los extremos N- y C-terminales, generado enlaces covalentes que promueven la estabilización de estructuras fibrilares unidimensionales (1D) de CTPRs.(Mejías et al., 2014) La dimensionalidad de estos materiales se extendió a la segunda dimensión gracias a la tendencia natural de interacción lateral entre las superhélices. Durante los últimos años, se han desarrollado varios materiales bidimensionales (2D) basados en CTPRs mediante diferentes enfoques, demostrando la versatilidad y el potencial de estas proteínas para formar materiales nanoestructurados. Un ejemplo fue en el que se desarrollaron monocapas de CTPR20 añadiendo una cisteína en el extremo C-terminal para adherirlas a una superficie de oro mediante el enlace oro-azufre. El autoensamblaje lateral natural entre las proteínas junto su unión a la superficie de oro mediante el enlace con las cisteínas permitió el desarrollo de una monocapa compacta de proteínas.(Mejías et al., 2016) Otro ejemplo es el desarrollo de películas delgadas de CTPRs mediante la disposición de estas sobre una película de teflón, en el que el secado facilita el autoensamblaje inherente de estas proteínas. Estas películas delgadas no solo demostraron tener orden macroscópico, sino que además las proteínas conservaron su estructura nativa en el propio material, siendo este un requisito fundamental para el desarrollo de materiales funcionales (Figura 3A).(Grove et al., 2013) La investigación sobre estos materiales basados en CTPRs dio un paso más adelante gracias al estudio de su capacidad conductora. Estos materiales basados en CTPRs autoensambladas mostraron conducción, aunque baja, la cual fue potenciada mediante la funcionalización de las proteínas con nanopartículas de oro (Figura 3B).(Mejías et al., 2021)



**Figura 3. Materiales basados en el ensamblaje de CTPRs.** A. Películas de CTPR autoensambladas. Esquema adaptado de la referencia y permiso de (Grove et al., 2013a). B. Películas autoensambladas de CTPR con capacidad conductora. Esquema adaptado de la referencia y permiso de (Mejías et al., 2021a). C. Coensamblaje entre fibras de péptidos autoensambladas con proteínas CTPR modificadas con uno o dos péptidos anfifílicos, dando lugar al desarrollo de fibras unidimensionales o un paracristal bidimensional, respectivamente. Esquema adaptado de la referencia y permiso de (Perez-Chirinos et al., 2025).

A pesar del control sobre la morfología y propiedades de estas estructuras autoensambladas, aumentar la complejidad de estos sistemas puede tener grandes beneficios para ampliar el número de aplicaciones para los que se pueden usar estos materiales. La combinación de dos moléculas diferentes que se ensamblan para formar estructuras supramoleculares mediante interacciones no-covalentes se denomina coensamblaje. El coensamblaje de moléculas pequeñas derivadas de péptidos para formar estructuras supramoleculares se ha estudiado ampliamente durante los últimos años. (Alakpa et al., 2016; Freeman et al., 2018; Sasselli & Syrgiannis, 2020) Sin embargo, área desafiante en el desarrollo de materiales supramoleculares es el coensamblaje de proteínas. Un ejemplo de estos sistemas complejos formados por el coensamblaje de distintas proteínas fue la investigación llevada a cabo en el laboratorio del Prof. David Baker en el que desarrollaron una matriz bidimensional híbrida basado en la estructura de las capas S, compuesta por dos proteínas diseñadas completamente *de novo* espe-

cíficamente para coensamblarse en matrices hexagonales (Ben-Sasson et al., 2021).

Un paso extra de complejidad a incluir en estos sistemas es inducir el coensamblaje entre moléculas pequeñas y macromoléculas para formar sistemas con una topología determinada y ordenada. El coensamblaje entre péptidos y proteínas presenta un gran potencial para desarrollar materiales funcionales bioactivos gracias a la capacidad de ambos componentes como unidades estructurales para formar sistemas ordenados, su biocompatibilidad y funcionalidad, añadido a la amplia versatilidad que las proteínas presentan. Un ejemplo de estos sistemas fue el llevado a cabo en el laboratorio del Prof. Joel H. Collier en el que desarrollaron fibras unidimensionales mediante el coensamblaje de proteínas marcadas con péptidos amiloides y péptidos amiloides libres. (Hudalla et al., 2014) Otro ejemplo en el que el coensamblaje entre péptidos y proteínas se lleva a un nivel de complejidad mayor fue el desarrollado en nuestro grupo de investigación en



el que fueron capaces de modular la dimensionalidad (1D y 2D) de los materiales coensamblados, dependiendo del diseño específico de la proteína. En primer lugar, se diseñaron fibras supramoleculares compuestas por el autoensamblaje de péptidos anfifílicos. En segundo lugar, dos proteínas CTPR fueron diseñadas mediante la adición de uno o dos péptidos anfifílicos en los extremos de la proteína, por el que mediante el coensamblaje de los péptidos unidos a las proteínas y las fibras autoensambladas se desarrollaron materiales supramoleculares coensamblados unidimensionales y bidimensionales, respectivamente (Figura 3C). (Perez-Chirinos et al., 2025) El sistema bidimensional presentaba una anisotropía y orden características de un sistema paracristalino altamente ordenado, conseguido por el coensamblaje de ambos componentes que actúan como unidades estructurales.

#### NANOMATERIALES HÍBRIDOS BASADOS EN PROTEÍNAS

Los nanomateriales híbridos son estructuras formadas por la combinación de al menos un nanomaterial (material con al menos una dimensión en la escala nanométrica, es decir, menor a  $10^{-9}$  metros) con uno o más materiales. Esta integración da lugar a una estructura única que mantiene sus dimensiones en la nanoescala y presenta propiedades emergentes derivadas de la interacción entre sus componentes. La estructura y funcionalidad de estos nanomateriales están determinadas por la naturaleza química y la arquitectura molecular de los componentes individuales, que al combinarse pueden generar nuevas propiedades o mejorar las ya existentes. (Yáñez-Seño et al., 2019)

En estos sistemas híbridos, cada componente desempeña al menos un papel específico. Uno de los componentes individuales suele proporcionar estabilidad estructural, mientras que el otro aporta funcionalidad como por ejemplo propiedades ópticas, conductoras o catalíticas. Los componentes orgánicos que se emplean para formar nanohíbridos incluyen pequeñas moléculas, polímeros, dendrímeros o biomoléculas, como ADN o proteínas. Entre los componentes inorgánicos más empleados se encuentran materiales como metales nobles, óxidos de hierro, puntos cuánticos o materiales de carbono.

La incorporación de biomoléculas en estos nanomateriales híbridos ofrece ventajas clave, como una mayor biocompatibilidad, solubilidad en medio acuoso, y estabilidad en condiciones biológicas, lo que los hace especialmente prometedores para aplicaciones en biomedicina o biotecnología.

La fabricación de estos bionanomateriales híbridos se realiza principalmente siguiendo dos metodologías diferentes, dependiendo del procedimiento de ensamblaje que se utiliza para la síntesis del elemento funcional. Una primera estrategia, consiste en la conjugación de los distintos componentes a través de enlaces moleculares o fuerzas fisicoquímicas. En el caso de los bionanomateriales basados en proteínas, se seleccionan normalmente los aminoácidos para la conjugación covalente o no covalente en la superficie de la proteína para llevar a cabo el anclaje del nanomaterial a la biomolécula. (Rana et al., 2010) La segunda estrategia para la generación de bionanomateriales es la síntesis *in situ*, que implica el crecimiento del nanomaterial en presencia de la biomolécula estabilizadora para dar lugar al nanomaterial híbrido. La biomolécula proporciona el soporte y ambiente químico adecuado para la estabilización del nanomaterial. En comparación con el enfoque de conjugación directa a proteínas mencionado anteriormente, la síntesis *in situ* permite protocolos sintéticos sencillos de un solo paso que determinan la ubicación del nanomaterial en sitios específicos dentro de la proteína, al tiempo que se preserva el tamaño a nanoescala del híbrido.

Las proteínas son especialmente atractivas como andamiaje para la síntesis de nanomateriales híbridos, ya que contienen numerosos grupos químicos funcionales (tioles, imidazoles y carboxilos) capaces de coordinar iones metálicos. (Degtyar et al., 2014; Holten-andersen & Buehler, 2021) que pueden utilizarse como sitios de unión y nucleación de metales, así como promover el crecimiento de los nanomateriales de forma controlada. Por ejemplo, se ha observado que las tirosinas reducen los iones metálicos, y que la capacidad de reducción aumenta a un pH superior al pKa de la cadena lateral fenólica de la tirosina (en torno a 10). (Xie et al., 2007) Esta característica posibilita la síntesis directa de nanopartículas (NP) a temperatura ambiente en una solución acuosa sin la necesidad de tensioactivos orgánicos ni reactivos tóxicos, que suponen un elevado coste y riesgos medioambientales. La comprensión de la función de los distintos aminoácidos en la coordinación y reducción de los iones metálicos permite



ajustar el tamaño y las características de las NP a través de la modificación de la secuencia de la proteína y, en consecuencia, de su estructura. Además, la biocompatibilidad de las proteínas facilita el posterior empleo de estos híbridos en aplicaciones biomédicas. El uso de andamios proteicos también puede mejorar la estabilidad, solubilidad en agua y las propiedades de orientación de los nanomateriales al actuar como interfaz entre la NP y el entorno. Por último, la diversidad química presente en la proteína permite modificar la superficie con otros elementos funcionales.(Meng et al., 2020)

Entre los híbridos proteína-metal, los nanoclústeres de metales nobles estabilizados con proteínas, en particular, los nanoclústeres de Au (AuNC) han atraído un interés considerable debido a su gran fotoluminiscencia, fluorescencia dependiente del tamaño, fotoestabilidad y biocompatibilidad. Estos nanoclústeres constan de unos pocos a cientos de átomos y tamaños inferiores a 2 nm, y se consideran intermedios entre las nanopartículas de oro (AuNP) y las moléculas aisladas. El método más utilizado para su síntesis mediada por proteínas consiste en la coordinación de iones Au(III) en aminoácidos reactivos, como cisteínas e histidinas, seguido de su reducción a Au(0) a un pH alto o mediante la adición de agentes reductores fuertes, como NaOH o  $\text{NaBH}_4$ , o suaves como el ácido ascórbico, para lograr una reducción total o parcial del metal. Desde el primer trabajo publicado por Xie et al. en 2009,(Xie et al., 2009) en el que se empleó albúmina de suero bovino (BSA) para preparar nanomateriales de oro fluorescentes, se ha utilizado una gran cantidad de proteínas naturales como andamiaje molecular para la síntesis de este tipo de nanomateriales híbridos. La ovoalbúmina, papaína, glucosa oxidasa, peroxidasa de rábano, pepsina, tripsina o lisozima son algunas de las proteínas naturales que se han empleado como estructura biomolecular para la estabilización de híbridos de oro fluorescentes. Sin embargo, el uso de estas proteínas naturales para la síntesis de nanomateriales híbridos presenta limitaciones dadas por su propia secuencia y estructura molecular. Por el contrario, las proteínas diseñadas son una herramienta prometedora para la síntesis y estabilización de nanomateriales híbridos con propiedades mejoradas y funcionalidades biológicas codificadas por proteínas.(Beloqui & Cortajarena, 2020)

Nuestro grupo de investigación ha demostrado el potencial de las proteínas ingenierizadas en la generación de nanomateriales híbridos con propieda-

des ópticas definidas. Se demostró por primera vez que las proteínas de repetición CTPR con una sola cisteína en su secuencia pueden estabilizar AuNC de manera eficaz, dando lugar a nanoestructuras híbridas funcionales con emisión fotoluminiscente roja.(Couleaud et al., 2015) Además, mediante la ingeniería de proteínas se han introducido sitios de coordinación de metales en la secuencia de proteína CTPR para la síntesis de AuNC altamente luminiscentes. Los sitios de unión de metales, basados en residuos de histidinas, facilitaron la estabilización de híbridos proteína-AuNC con excelentes propiedades fluorescentes emisoras de luz azul, mientras que los basados en cisteínas produjeron AuNC tanto fluorescencia azul, como emisión dual, azul y roja, centradas en 450 y 700 nm, respectivamente.(Aires et al., 2019; Aires, Maestro, et al., 2021; Aires, Sousaraei, et al., 2021) También se ha demostrado que la introducción de triptófanos en posiciones específicas mejoraba las propiedades de fotoluminiscencia debido al entorno proteico rico en electrones proporcionado por los triptófanos y la transferencia de energía de estos aminoácidos a los AuNC.(Aires, Sousaraei, et al., 2021) Además, cuando se combinaron AuNC sin ligandos orgánicos con proteínas CTPR que contenían 16 aminoácidos de coordinación de histidina o cisteína, se obtuvieron híbridos con propiedades ópticas distintas en términos de emisión de fluorescencia y tiempos de vida de luminiscencia.(Lopez-Martinez et al., 2022)

Estas investigaciones han puesto de manifiesto el papel relevante del andamiaje proteico en las características fotofísicas de los híbridos resultantes, ya que las proteínas con estructuras similares y un entorno de coordinación distinto permitieron un ajuste preciso de la longitud de onda de emisión, rendimiento cuántico, tiempo de vida y mecanismos de emisión.

## APLICACIONES

Las proteínas de diseño y los nanomateriales híbridos basados en proteínas ingenierizadas disponen de un amplio rango aplicaciones, que van desde la catálisis y la biomedicina hasta el desarrollo de materiales conductores. Entre estas aplicaciones, las nanopartículas funcionalizadas con proteínas destacan por su versatilidad y potencial para abordar retos específicos en diversas áreas.

## Aplicaciones biomédicas

En el ámbito biomédico, las nanopartículas de óxido de hierro (IONP) han demostrado ser especialmente prometedoras, particularmente como agentes de contraste para imagen por resonancia magnética (IRM) debido a sus propiedades magnéticas y biocompatibilidad. Sin embargo, aunque varias IONP han sido aprobadas por las agencias reguladoras como agentes de contraste para IRM, su aplicación como agentes de contraste negativo limita su uso. Además, existe una creciente necesidad de desarrollar agentes de contraste moleculares capaces de dirigirse específicamente a biomarcadores, lo que permitiría diagnósticos más precisos y sensibles.(Wahsner et al., 2019)

Para abordar estos desafíos, se ha aplicado la ingeniería de proteínas para conseguir estabilizar IONPs con propiedades magnéticas definidas, creando nanopartículas de óxido de hierro estabilizadas con proteínas (Prot-IONPs)(Aires et al., 2022) y aprovechando la diversidad química de las proteínas para funcionalizar las Prot-IONPs con moléculas que reconozcan biomarcadores específicos (Figura 4).(Guedes et al., 2024)

La versatilidad química del andamiaje proteico CTPR y la estabilidad del sistema se utilizó para desarrollar un agente de contraste dirigido.(Guedes et al., 2024) Para ello, se utilizó una proteína ingenierizada para estabilizar IONPs, con valores

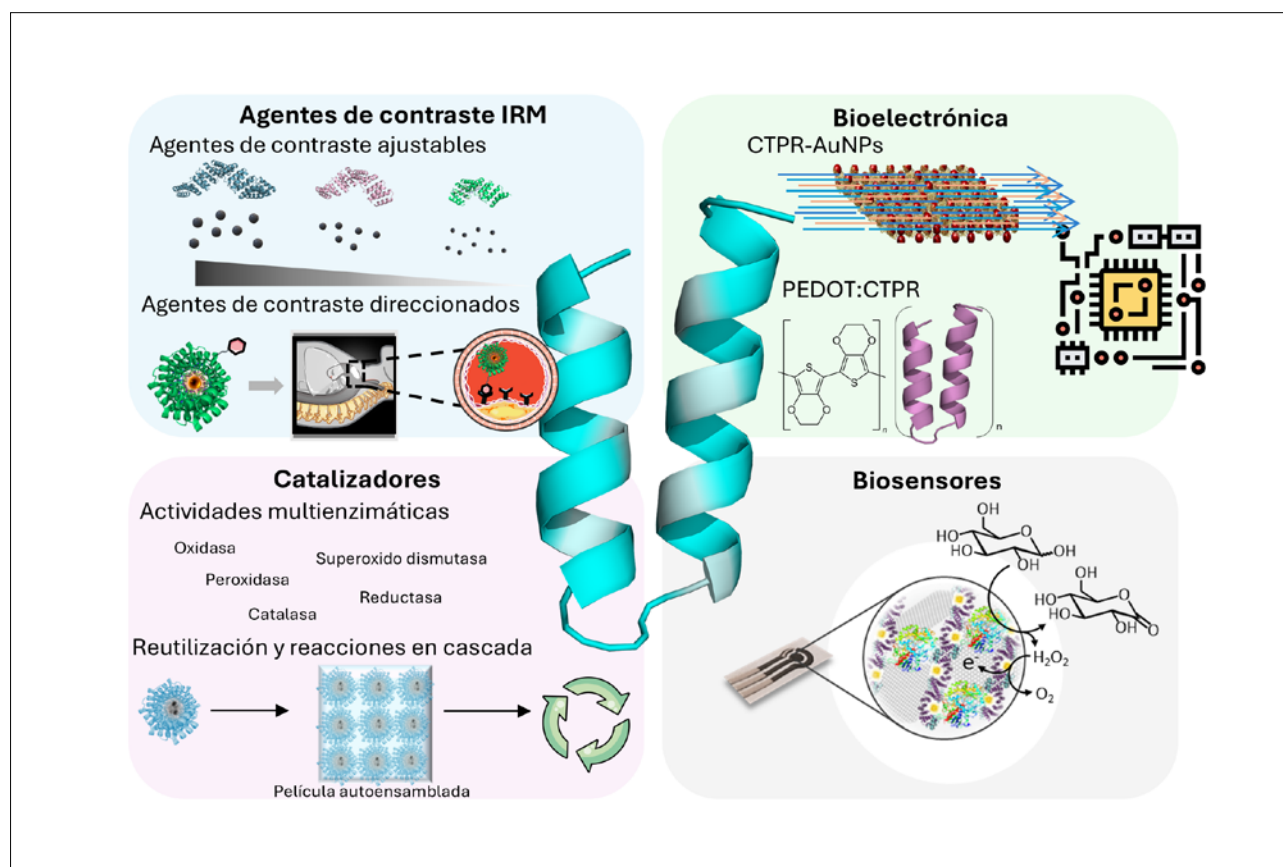


Figura 4. Versatilidad de las CTPRs para el desarrollo de materiales híbridos innovadores en distintos campos. Los avances más recientes incluyen el desarrollo de agentes de contraste de resonancia magnética mejorados y específicos, en los que las propiedades de relaxividad pueden ajustarse en función del tamaño de la proteína; la creación de híbridos proteína-nanoclúster que presentan múltiples funciones catalíticas y pueden autoensamblarse y reutilizarse; el uso de coensamblados de péptido-proteína, la integración de proteínas-AuNPs, y de polímeros conductores dopados con proteínas para producir materiales conductores; y la aplicación de híbridos proteína-nanoclúster como biosensores de alta sensibilidad. La figura fue generada parcialmente utilizando Servier Medical Art, proporcionado por Servier, licenciado bajo una licencia Creative Commons Atribución 3.0 unported. Paneles adaptados con permiso de (Guedes et al., 2024), (Mejías et al., 2021) y (Silvestri et al., 2023).

de relaxividad mejorados en comparación con los agentes de contraste utilizados en la práctica clínica.(European Medicines Agency, n.d.; Rohrer et al., 2005; Wahsner et al., 2019) Este híbrido mostró los valores de relaxividad más altos entre múltiples andamiajes proteicos evaluados, y no presentó citotoxicidad, convirtiéndose en el candidato ideal para el desarrollo de agentes de contraste dirigidos. Dada su prevalencia, se seleccionó la detección de aterosclerosis, y para ello, el andamiaje proteico se conjugó con alendronato una molécula selectiva de las calcificaciones de las placas de ateroma.(Caffarelli et al., 2017; Li et al., 2016; Pellico et al., 2021) Aunque en este estudio el alendronato sirvió como prueba de concepto de agente diana para las calcificaciones en la aterosclerosis, podrían emplearse otras moléculas, estableciendo así una plataforma versátil y biocompatible para la detección de diversas afecciones. Gracias al sencillo protocolo de conjugación basado en la química tiol-maleimida desarrollado, es posible utilizar cualquier pequeña molécula inorgánica, lo que permite el desarrollo de agentes de contraste «a la carta» para una gran variedad de enfermedades. Además, este estudio demostró la robustez de la estrategia de conjugación y del híbrido proteína-nanomaterial resultante, que mantiene su estabilidad tras una inyección intravenosa *in vivo* y se acumula en la diana, permitiendo la detección de la placa aterosclerótica con contraste positivo.

### Aplicaciones en catálisis

En el ámbito de la catálisis, las enzimas desempeñan un papel crucial en nuestra vida cotidiana, siendo esenciales en una amplia gama de procesos biológicos, así como en la industria biotecnológica, médica y alimentaria.(Reetz et al., 2024; Wu et al., 2021; Yushkova et al., 2019) Sin embargo, estas presentan inconvenientes inherentes, como la pérdida de actividad debido a su desnaturalización y las dificultades de purificación, almacenamiento y reciclado, lo que limita sus aplicaciones. Las nanozimas artificiales han surgido como un enfoque alternativo que puede adaptarse a necesidades específicas y modularse para superar los inconvenientes de las enzimas. La actividad de los nanozimas se asemeja a la de las enzimas, y adicionalmente poseen una gran estabilidad estructural, actividad catalítica ajustable, diversidad funcional, versatilidad, reciclabilidad y viabilidad en la

preparación a gran escala.(Wei & Wang, 2013) En colaboración entre nuestro laboratorio y el grupo de la Dra. Ana Beloqui se diseñaron y desarrollaron nanozimas basadas en la proteína CTPR como guía para el crecimiento y la estabilización de nanoclústeres metálicos (NCs) sintetizadas *in situ*. Las nanozimas basadas en platino (Pt), que utilizan un andamiaje proteínico CTPR con sitios de coordinación de histidina diseñados, presentaron una mayor termoestabilidad y resistencia al peróxido de hidrógeno que las peroxidasas naturales, como la peroxidasa de rábano. Además, se fabricaron películas compuestas de nanozimas utilizando las propiedades de autoensamblaje del andamiaje CTPR. Estos materiales demuestran un rendimiento catalítico sostenido a lo largo de múltiples ciclos de reacción, mostrando el potencial de las nanozimas provocadas por proteínas como una alternativa prometedora a las enzimas naturales en diversas aplicaciones. (López-Domene et al., 2023) (Figura 4).

### Aplicaciones en bioelectrónica

Un enfoque innovador que podría revolucionar diferentes campos de aplicación es el desarrollo de materiales conductores basados en proteínas. Como se ha demostrado y discutido anteriormente, las capacidades de autoensamblaje permiten la fabricación de ensamblajes funcionales.(López-Andarias et al., 2018; Mejías et al., 2016) Trabajos paralelos demostraron que la incorporación de AuNPs para la interconexión eléctrica de enzimas redox, o el ensamblaje de la proteína hemo asistido por AuNPs mejoraban efectivamente de la eficiencia de transferencia de carga a larga distancia.(Abad et al., 2009; Jensen et al., 2007; Xiao et al., 2003) Esto inspiró el uso de AuNPs como elementos conductores en películas híbridas macroscópicas basadas en CTPR (Figura 4). En esta investigación, llevada a cabo en nuestro laboratorio, las proteínas CTPRs fueron diseñadas para moldear AuNPs,(Mejías et al., 2021) desarrollando películas sólidas tanto de CTPR como de CTPR-AuNPs.(Grove et al., 2013) Estas películas de CTPR mostraron una conductividad registrable a escalas de longitud micro-métricas y atribuida principalmente al transporte de carga protónica. Además, las películas híbridas CTPR-AuNPs presentaron una mejora en la conductividad en comparación con las películas CTPR y, presumiblemente, diferentes propiedades de transporte de carga. En un estudio posterior, se



desarrollaron unas películas de un material con orden anisotrópico basado en el coensamblaje de fibras de péptidos autoensamblados y CTPRs modificadas, que presentó las características de conductividad protónica típicas de las películas formadas por el autoensamblaje de proteínas CTPR.(Perez-Chirinos et al., 2025) Estos resultados resaltan la importancia de la proteína CTPR como material bioconductor, que puede ser mejorada mediante el uso de nanoelementos altamente conductores, y con la posibilidad de obtener un material con una topología altamente ordenada mediante el coensamblaje con otras biomoléculas sin perder las capacidades conductoras de las CTPRs, para la futura aplicación de sistemas híbridos basados en proteínas en el campo de la bioelectrónica.

Como enfoque alternativo, la utilización de proteínas como dopantes de polímeros conductores de la electricidad podría proporcionar una plataforma flexible y adaptable para la ingeniería de materiales con diversas morfologías y funciones, mejorando al mismo tiempo la biocompatibilidad de los compuestos. En un estudio pionero, se dopó PEDOT (poli(3,4-etilendioxitiofeno)) con una familia de proteínas CTPR de distintas longitudes para crear un nuevo material conductor.(Dominguez-Alfaro et al., 2024) La interacción entre las CTPRs y PEDOT dio lugar a un material con una conducción mixta iónica-electrónica, con valores de conductividad electrónica comparables a los de PEDOT:PSS, el sistema de referencia en bioelectrónica. Además, mostró una biocompatibilidad mejorada con fibroblastos. Este estudio pone de manifiesto que el PEDOT:CTPR es una alternativa prometedora al PEDOT:PSS en bioelectrónica, ya que combina excelentes propiedades electrónicas, biocompatibilidad e idoneidad para técnicas de fabricación avanzadas como la impresión por inyección de tinta.

### **Aplicaciones en biosensores**

Por último, una aplicación similar derivada de estos nanomateriales fue la generación de tintas electroactivas y autoensamblables para impresión por inyección, basadas en la combinación de nanohíbridos metálicos proteicos y grafeno exfoliado. La formulación de la tinta incluye proteínas CTPR que se emplearon como andamiaje para la síntesis de NC bimetalicos de Au y Pt y como unidad

estructural para la formación de películas de proteínas autoensambladas en seco. La incorporación de grafeno en la formulación de la tinta, mejora drásticamente las propiedades electrocatalíticas de la tinta, obteniendo un material híbrido eficiente para la detección electroquímica de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ). Utilizando esta biotinta, se pueden fabricar dispositivos analíticos electroquímicos basados en papel (ePAD) desechables y sostenibles para detectar  $H_2O_2$ . Además, se pueden incluir enzimas oxidoreductasas en la composición, con el fin de imprimir por inyección de tinta distintos biosensores amperométricos enzimáticos, como, por ejemplo, sensores de glucosa. (Silvestri et al., 2023)

## **CONCLUSIONES**

Este artículo pone de manifiesto el gran potencial de las proteínas de repetición, y en particular el de las CTPRs, como plataformas versátiles para el desarrollo de materiales funcionales. Su simplicidad estructural y modularidad permiten un alto grado de control sobre el diseño de materiales autoensamblados e híbridos, con propiedades específicas, como conductividad eléctrica, fotoconducción, capacidad para generar contraste en imagen molecular y catálisis, entre otras.

Los avances descritos en este trabajo demuestran cómo estas proteínas de repetición, gracias a su naturaleza modular, se han consolidado como plataformas eficaces para el diseño de materiales funcionales. Paralelamente, los avances recientes en la ingeniería de proteínas han impulsado una expansión acelerada del campo, permitiendo el diseño de proteínas con funciones específicas para abordar retos complejos. En los próximos años, se espera que esta disciplina continúe avanzando, impulsada por mejoras en aproximaciones computacionales y la aplicación de inteligencia artificial, así como avances experimentales con metodologías de alto rendimiento. Esto permitirá diseñar proteínas con propiedades optimizadas para aplicaciones específicas de forma más rápida y con un mayor grado de complejidad, ofreciendo soluciones desde la ingeniería de proteínas a desafíos globales, como enfermedades emergentes, terapias avanzadas, sostenibilidad ambiental y energética, entre otros.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores/as de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aires, A., Fernández-Afonso, Y., Guedes, G., Guisasola, E., Gutiérrez, L., & Cortajarena, A. L. (2022). Engineered Protein-Driven Synthesis of Tunable Iron Oxide Nanoparticles as T1 and T2 Magnetic Resonance Imaging Contrast Agents. *Chemistry of Materials*, 34(24), 10832–10841. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.2c01746>
2. Aires, A., Llarena, I., Moller, M., Castro-Smirnov, J., Cabanillas-Gonzalez, J., & Cortajarena, A. L. (2019). A Simple Approach to Design Proteins for the Sustainable Synthesis of Metal Nanoclusters. *Angew. Chem.*, 131(19), 6280–6285. <https://doi.org/10.1002/ange.201813576>
3. Aires, A., Lopez-Martinez, E., & Cortajarena, A. (2018). Sensors Based on Metal Nanoclusters Stabilized on Designed Proteins. *Biosensors*, 8(4), 110. <https://doi.org/10.3390/bios8040110>
4. Aires, A., Maestro, D., Ruiz del Rio, J., Palanca, A. R., Lopez-Martinez, E., Llarena, I., Geraki, K., Sanchez-Cano, C., Villar, A. V., & Cortajarena, A. L. (2021). Engineering multifunctional metal/protein hybrid nanomaterials as tools for therapeutic intervention and high-sensitivity detection. *Chemical Science*, 12(7), 2480–2487. <https://doi.org/10.1039/D0SC05215A>
5. Aires, A., Sousaraei, A., Möller, M., Cabanillas-Gonzalez, J., & Cortajarena, A. L. (2021). Boosting the Photoluminescent Properties of Protein-Stabilized Gold Nanoclusters through Protein Engineering. *Nano Letters*, 21(21), 9347–9353. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c03768>
6. Alakpa, E. V., Jayawarna, V., Lampel, A., Burgess, K. V., West, C. C., Bakker, S. C. J., Roy, S., Javid, N., Fleming, S., Lamprou, D. A., Yang, J., Miller, A., Urquhart, A. J., Frederix, P. W. J. M., Hunt, N. T., Péault, B., Ulijn, R. V., & Dalby, M. J. (2016). Tunable Supramolecular Hydrogels for Selection of Lineage-Guiding Metabolites in Stem Cell Cultures. *Chem*, 1(2), 298–319. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.07.001>
7. Andrade, M. A., Perez-Iratxeta, C., & Ponting, C. P. (2001). Protein repeats: Structures, functions, and evolution. *Journal of Structural Biology*, 134(2–3), 117–131. <https://doi.org/10.1006/jsbi.2001.4392>
8. Baek, M., DiMaio, F., Anishchenko, I., Dauparas, J., Ovchinnikov, S., Lee, G. R., Wang, J., Cong, Q., Kinch, L. N., Schaeffer, R. D., Millán, C., Park, H., Adams, C., Glassman, C. R., DeGiovanni, A., Pereira, J. H., Rodrigues, A. V., van Dijk, A. A., Ebrecht, A. C., ... Baker, D. (2021). Accurate prediction of protein structures and interactions using a three-track neural network. *Science*, 373(6557), 871–876. <https://doi.org/10.1126/science.abj8754>
9. Beloqui, A., & Cortajarena, A. L. (2020). Protein-based functional hybrid bionanomaterials by bottom-up approaches. *Current Opinion in Structural Biology*, 63, 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.sbi.2020.04.005>
10. Ben-Sasson, A. J., Watson, J. L., Sheffler, W., Johnson, M. C., Bittleston, A., Somasundaram, L., Decarreau, J., Jiao, F., Chen, J., Mela, I., Drabek, A. A., Jarrett, S. M., Blacklow, S. C., Kaminski, C. F., Hura, G. L., De Yoreo, J. J., Kollman, J. M., Ruohola-Baker, H., Derivery, E., & Baker, D. (2021). Design of biologically active binary protein 2D materials. *Nature*, 589(7842), 468–473. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03120-8>
11. Binz, H. K., Stumpp, M. T., Forrer, P., Amstutz, P., & Plückthun, A. (2003). Designing repeat proteins: Well-expressed, soluble and stable proteins from combinatorial libraries of consensus ankyrin repeat proteins. *Journal of Molecular Biology*, 332(2), 489–503. [https://doi.org/10.1016/S0022-2836\(03\)00896-9](https://doi.org/10.1016/S0022-2836(03)00896-9)
12. Boersma, Y. L., & Plu, A. (2011). DARPins and other repeat protein scaffolds: advances in engineering and applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 22, 849–857. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.06.004>



13. Caffarelli, C., Montagnani, A., Nuti, R., & Gonnelli, S. (2017). Bisphosphonates, atherosclerosis and vascular calcification: Update and systematic review of clinical studies. *Clinical Interventions in Aging*, 12, 1819–1828. <https://doi.org/10.2147/CIA.S138002>
14. Carter, N. A., & Grove, T. Z. (2015). Repeat-Proteins Films Exhibit Hierarchical Anisotropic Mechanical Properties. *Biomacromolecules*, 16(3), 706–714. <https://doi.org/10.1021/bm501578j>
15. Coquille, S., Filipovska, A., Chia, T., Rajappa, L., Lingford, J. P., Razif, M. F. M., Thore, S., & Rackham, O. (2014). An artificial PPR scaffold for programmable RNA recognition. *Nature Communications*, 5, 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms6729>
16. Cortajarena, A. L., Mochrie, S. G. J., & Regan, L. (2011). Modulating repeat protein stability: The effect of individual helix stability on the collective behavior of the ensemble. *Protein Science*, 20(6), 1042–1047. <https://doi.org/10.1002/pro.638>
17. Cortajarena, A. L., Wang, J., & Regan, L. (2010). Crystal structure of a designed tetratricopeptide repeat module in complex with its peptide ligand. *The FEBS Journal*, 277(4), 1058–1066. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2009.07549.x>
18. Couleaud, P., Adan-Bermudez, S., Aires, A., Mejías, S. H., Sot, B., Somoza, A., & Cortajarena, A. L. (2015). Designed Modular Proteins as Scaffolds to Stabilize Fluorescent Nanoclusters. *Biomacromolecules*, 16(12), 3836–3844. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.5b01147>
19. Degtyar, E., Harrington, M. J., Politi, Y., & Fratzl, P. (2014). The Mechanical Role of Metal Ions in Biogenic Protein-Based Materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 53(45), 12026–12044. <https://doi.org/10.1002/anie.201404272>
20. Divine, R., Dang, H. V., Ueda, G., Fallas, J. A., Vulovic, I., Sheffler, W., Saini, S., Zhao, Y. T., Raj, I. X., Morawski, P. A., Jennewein, M. F., Homad, L. J., Wan, Y.-H., Tooley, M. R., Seeger, F., Etemadi, A., Fahning, M. L., Lazarovits, J., Roederer, A., ... Baker, D. (2021). Designed proteins assemble antibodies into modular nanocages. *Science*, 372(6537). <https://doi.org/10.1126/science.abd9994>
21. Dominguez-Alfaro, A., Casado, N., Fernandez, M., Garcia-Esnaola, A., Calvo, J., Mantione, D., Calvo, M. R., & Cortajarena, A. L. (2024). Engineering Proteins for PEDOT Dispersions: A New Horizon for Highly Mixed Ionic-Electronic Biocompatible Conducting Materials. *Small*, 20(22), 1–16. <https://doi.org/10.1002/sml.202307536>
22. Donnelly, A. E., Murphy, G. S., Digianantonio, K. M., & Hecht, M. H. (2018). A de novo enzyme catalyzes a life-sustaining reaction in *Escherichia coli*. *Nature Chemical Biology*, 14(3), 253–255. <https://doi.org/10.1038/nchembio.2550>
23. European Medicines Agency. (n.d.). Gadolinium-containing contrast agents. Retrieved November 30, 2021, from <https://www.ema.europa.eu/en/medicines/human/referrals/gadolinium-containing-contrast-agents>
24. Ferrari, E., Soloviev, M., Niranjana, D., Arsenault, J., Gu, C., Vallis, Y., O'Brien, J., & Davletov, B. (2012). Assembly of Protein Building Blocks Using a Short Synthetic Peptide. *Bioconjugate Chemistry*, 23(3), 479–484. <https://doi.org/10.1021/bc2005208>
25. Freeman, R., Han, M., Álvarez, Z., Lewis, J. A., Wester, J. R., Stephanopoulos, N., McClendon, M. T., Lynsky, C., Godbe, J. M., Sangji, H., Luijten, E., & Stupp, S. I. (2018). Reversible self-assembly of superstructured networks. *Science*, 362(6416), 808–813. <https://doi.org/10.1126/science.aat6141>
26. Grove, T. Z., Regan, L., & Cortajarena, A. L. (2013). Nanostructured functional films from engineered repeat proteins. *Journal of The Royal Society Interface*, 10(83), 20130051. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0051>
27. Guedes, G., Uribe, K. B., Martínez-Parra, L., Aires, A., Beraza, M., Ruiz-Cabello, J., & Cortajarena, A. L. (2024). Engineering Protein–Nanoparticle Hybrids as Targeted Contrast Agents. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 16(44), 59849–59861. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c12799>
28. Gully, B. S., Shah, K. R., Lee, M., Shearston, K., Smith, N. M., Sadowska, A., Blythe, A. J., Bernath-Levin, K., Stanley, W. A., Small, I. D., & Bond, C. S. (2015). The design and structural characterization of a synthetic pentatricopeptide repeat



- protein. *Acta Crystallographica Section D: Biological Crystallography*, 71, 196–208. <https://doi.org/10.1107/S1399004714024869>
29. Holten-andersen, N., & Buehler, M. J. (2021). Transition-metal coordinate bonds for bioinspired macromolecules with tunable mechanical properties. *Nature Reviews Materials*, 6, 421–436. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00270-z>
30. Huang, P.-S., Boyken, S. E., & Baker, D. (2016). The coming of age of de novo protein design. *Nature*, 537(7620), 320–327. <https://doi.org/10.1038/nature19946>
31. Hudalla, G. A., Sun, T., Gasiorowski, J. Z., Han, H., Tian, Y. F., Chong, A. S., & Collier, J. H. (2014). Gradated assembly of multiple proteins into supramolecular nanomaterials. *Nature Materials*, 13(8), 829–836. <https://doi.org/10.1038/nmat3998>
32. Jumper, J., Evans, R., Pritzel, A., Green, T., Figurnov, M., Ronneberger, O., Tunyasuvunakool, K., Bates, R., Žídek, A., Potapenko, A., Bridgland, A., Meyer, C., Kohl, S. A. A., Ballard, A. J., Cowie, A., Romera-Paredes, B., Nikolov, S., Jain, R., Adler, J., ... Hassabis, D. (2021). Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature*, 596(7873), 583–589. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03819-2>
33. Kajander, T., Cortajarena, A. L., Main, E. R. G. G., Mochrie, S. G. J. J., & Regan, L. (2005). A New Folding Paradigm for Repeat Proteins. *Journal of the American Chemical Society*, 127(29), 10188–10190. <https://doi.org/10.1021/ja0524494>
34. Kajander, T., Cortajarena, A. L., Mochrie, S., & Regan, L. (2007). Structure and stability of designed TPR protein superhelices: unusual crystal packing and implications for natural TPR proteins. *Acta Crystallographica Section D Biological Crystallography*, 63(7), 800–811. <https://doi.org/10.1107/S09074444907024353>
35. L. Cortajarena, A., & Z. Grove, T. (2016). Protein-based Engineered Nanostructures (Vol. 940).
36. Lai, Y.-T., King, N. P., & Yeates, T. O. (2012). Principles for designing ordered protein assemblies. *Trends in Cell Biology*, 22(12), 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.tcb.2012.08.004>
37. Lee, S. C., Park, K., Han, J., Lee, J. J., Kim, H. J., Hong, S., Heu, W., Kim, Y. J., Ha, J. S., Lee, S. G., Cheong, H. K., Jeon, Y. H., Kim, D., & Kim, H. S. (2012). Design of a binding scaffold based on variable lymphocyte receptors of jawless vertebrates by module engineering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(9), 3299–3304. <https://doi.org/10.1073/pnas.1113193109>
38. Leman, J. K., Weitzner, B. D., Lewis, S. M., Adolf-Bryfogle, J., Alam, N., Alford, R. F., Aprahamian, M., Baker, D., Barlow, K. A., Barth, P., Basanta, B., Bender, B. J., Blacklock, K., Bonnet, J., Boyken, S. E., Bradley, P., Bystroff, C., Conway, P., Cooper, S., ... Bonneau, R. (2020). Macromolecular modeling and design in Rosetta: recent methods and frameworks. *Nature Methods*, 17(7), 665–680. <https://doi.org/10.1038/s41592-020-0848-2>
39. Li, N., Song, J., Zhu, G., Shi, X., & Wang, Y. (2016). Alendronate conjugated nanoparticles for calcification targeting. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 142, 344–350. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.03.015>
40. López-Domene, R., Vázquez-Díaz, S., Modin, E., Belouqui, A., & Cortajarena, A. L. (2023). An Emerging Nanozyme Class for à la carte Enzymatic-Like Activities based on Protein-Metal Nanocluster Hybrids. *Advanced Functional Materials*, 33(37), 1–13. <https://doi.org/10.1002/adfm.202301131>
41. Lopez-Martinez, E., Gianolio, D., Garcia-Orrit, S., Vega-Mayoral, V., Cabanillas-Gonzalez, J., Sanchez-Cano, C., & Cortajarena, A. L. (2022). Tuning the Optical Properties of Au Nanoclusters by Designed Proteins. *Advanced Optical Materials*, 10(1), 2101332. <https://doi.org/10.1002/adom.202101332>
42. MacKerell, A. D., Bashford, D., Bellott, M., Dunbrack, R. L., Evanseck, J. D., Field, M. J., Fischer, S., Gao, J., Guo, H., Ha, S., Joseph-McCarthy, D., Kuchnir, L., Kuczera, K., Lau, F. T. K., Mattos, C., Michnick, S., Ngo, T., Nguyen, D. T., Prodhom, B., ... Karplus, M. (1998). All-Atom Empirical Potential for Molecular Modeling and Dynamics Studies of Proteins. *The Journal of Physical Chemistry B*, 102(18), 3586–3616. <https://doi.org/10.1021/jp973084f>



43. Main, E. R. G., Xiong, Y., Cocco, M. J., D'Andrea, L., & Regan, L. (2003). Design of Stable  $\alpha$ -Helical Arrays from an Idealized TPR Motif. *Structure*, 11(5), 497–508. [https://doi.org/10.1016/S0969-2126\(03\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S0969-2126(03)00076-5)
44. Marcos, E., & Silva, D. (2018). Essentials of de novo protein design: Methods and applications. *WIREs Computational Molecular Science*, 8(6). <https://doi.org/10.1002/wcms.1374>
45. Mejias, S. H., Couleaud, P., Casado, S., Granados, D., Garcia, M. A., Abad, J. M., & Cortajarena, A. L. (2016). Assembly of designed protein scaffolds into monolayers for nanoparticle patterning. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 141, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.01.039>
46. Mejias, S. H., López-Martínez, E., Fernandez, M., Couleaud, P., Martin-Lasanta, A., Romera, D., Sanchez-Iglesias, A., Casado, S., Osorio, M. R., Abad, J. M., González, M. T., & Cortajarena, A. L. (2021). Engineering conductive protein films through nanoscale self-assembly and gold nanoparticles doping. *Nanoscale*, 13(14), 6772–6779. <https://doi.org/10.1039/D1NR00238D>
47. Mejías, S. H., Sot, B., Guantes, R., & Cortajarena, A. L. (2014). Controlled nanometric fibers of self-assembled designed protein scaffolds. *Nanoscale*, 6(19), 10982–10988. <https://doi.org/10.1039/C4NR01210K>
48. Meng, X., Zare, I., Yan, X., & Fan, K. (2020). Protein-protected metal nanoclusters: An emerging ultra-small nanozyme. *WIREs Biomedicine and Nanobiotechnology*, 12(3), e1602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wnan.1602>
49. Park, H., Bradley, P., Greisen, P., Liu, Y., Mulligan, V. K., Kim, D. E., Baker, D., & DiMaio, F. (2016). Simultaneous Optimization of Biomolecular Energy Functions on Features from Small Molecules and Macromolecules. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 12(12), 6201–6212. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.6b00819>
50. Parmeggiani, F., & Huang, P. (2017). Designing repeat proteins: a modular approach to protein design. *Current Opinion in Structural Biology*, 45, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.sbi.2017.02.001>
51. Parmeggiani, F., Pellarin, R., Larsen, A. P., Varadasetty, G., Stumpp, M. T., Zerbe, O., Caflisch, A., & Plückthun, A. (2008). Designed Armadillo Repeat Proteins as General Peptide-Binding Scaffolds: Consensus Design and Computational Optimization of the Hydrophobic Core. *Journal of Molecular Biology*, 376(5), 1282–1304. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2007.12.014>
52. Pellico, J., Fernández-Barahona, I., Ruiz-Cabello, J., Gutiérrez, L., Muñoz-Hernando, M., Sánchez-Guisado, M. J., Aiestaran-Zelaia, I., Martínez-Parra, L., Rodríguez, I., Bentzon, J., & Herranz, F. (2021). HAP-Multitag, a PET and Positive MRI Contrast Nanotracer for the Longitudinal Characterization of Vascular Calcifications in Atherosclerosis. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(38), 45279–45290. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c13417>
53. Perez-Chirinos, L., Almonte, L., Cortés-Osea, J. D., Solano, E., Calvo, M. R., Sasselli, I., & L. Cortajarena, A. (2025). Tuning the Dimensionality of Protein–Peptide Coassemblies to Build 2D Conductive Nanomaterials. *ACS Nano* 2025, 19, 17, 16500–16516. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.4c18613>
54. Phillips, J. J., Millership, C., & Main, E. R. G. (2012). Fibrous Nanostructures from the Self-Assembly of Designed Repeat Protein Modules. *Angewandte Chemie International Edition*, 51(52), 13132–13135. <https://doi.org/10.1002/anie.201203795>
55. Ponder, J. W., & Case, D. A. (2003). Force Fields for Protein Simulations (pp. 27–85). [https://doi.org/10.1016/S0065-3233\(03\)66002-X](https://doi.org/10.1016/S0065-3233(03)66002-X)
56. Rana, S., Yeh, Y.-C., & Rotello, V. M. (2010). Engineering the nanoparticle–protein interface: applications and possibilities. *Current Opinion in Chemical Biology*, 14(6), 828–834. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2010.10.001>
57. Reetz, M. T., Qu, G., & Sun, Z. (2024). Engineered enzymes for the synthesis of pharmaceuticals and other high-value products. *Nature Synthesis*, 3(1), 19–32. <https://doi.org/10.1038/s44160-023-00417-0>
58. Rohrer, M., Bauer, H., Mintorovitch, J., Requardt, M., & Weinmann, H.-J. (2005). Comparison of Magnetic Properties of MRI Contrast Media So-



- lutions at Different Magnetic Field Strengths. *Investigative Radiology*, 40(11), 715–724. <https://doi.org/10.1097/01.rli.0000184756.66360.d3>
59. Romeo, M. V., López-Martínez, E., Berganza-Granda, J., Goñi-de-Cerio, F., & Cortajarena, A. L. (2021). Biomarker sensing platforms based on fluorescent metal nanoclusters. *Nanoscale Advances*, 3(5), 1331–1341. <https://doi.org/10.1039/D0NA00796J>
60. Sasselli, I. R., & Syrgiannis, Z. (2020). Small Molecules Organic Co-Assemblies as Functional Nanomaterials. *European Journal of Organic Chemistry*, 2020(33), 5305–5318. <https://doi.org/10.1002/ejoc.202000529>
61. Saven, J. G. (2010). Computational protein design: Advances in the design and redesign of biomolecular nanostructures. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15(1–2), 13–17. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2009.06.002>
62. Silvestri, A., Vázquez-Díaz, S., Misia, G., Poletti, F., López-Domene, R., Pavlov, V., Zanardi, C., Cortajarena, A. L., & Prato, M. (2023). An Electroactive and Self-Assembling Bio-Ink, based on Protein-Stabilized Nanoclusters and Graphene, for the Manufacture of Fully Inkjet-Printed Paper-Based Analytical Devices. *Small*. <https://doi.org/10.1002/SMLL.202300163>
63. Suzuki, Y., Cardone, G., Restrepo, D., Zavattieri, P. D., Baker, T. S., & Tezcan, F. A. (2016). Self-assembly of coherently dynamic, auxetic, two-dimensional protein crystals. *Nature*, 533(7603), 369–373. <https://doi.org/10.1038/nature17633>
64. Tyka, M. D., Keedy, D. A., André, I., DiMaio, F., Song, Y., Richardson, D. C., Richardson, J. S., & Baker, D. (2011). Alternate States of Proteins Revealed by Detailed Energy Landscape Mapping. *Journal of Molecular Biology*, 405(2), 607–618. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2010.11.008>
65. Uribe, K. B., Guisasaola, E., Aires, A., López-Martínez, E., Guedes, G., Sasselli, I. R., & Cortajarena, A. L. (2021). Engineered Repeat Protein Hybrids: The New Horizon for Biologic Medicines and Diagnostic Tools. *Accounts of Chemical Research*, 54(22), 4166–4177. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.1c00440>
66. Wahsner, J., Gale, E. M., Rodríguez-Rodríguez, A., & Caravan, P. (2019). Chemistry of MRI Contrast Agents: Current Challenges and New Frontiers. *Chemical Reviews*, 119(2), 957–1057. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00363>
67. Watkins, D. W., Jenkins, J. M. X., Grayson, K. J., Wood, N., Steventon, J. W., Le Vay, K. K., Goodwin, M. I., Mullen, A. S., Bailey, H. J., Crump, M. P., MacMillan, F., Mulholland, A. J., Cameron, G., Sessions, R. B., Mann, S., & Anderson, J. L. R. (2017). Construction and in vivo assembly of a catalytically proficient and hyperthermostable de novo enzyme. *Nature Communications*, 8(1), 358. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00541-4>
68. Wei, H., & Wang, E. (2013). Nanomaterials with enzyme-like characteristics (nanozymes): next-generation artificial enzymes. *Chemical Society Reviews*, 42(14), 6060. <https://doi.org/10.1039/c3cs35486e>
69. Whitesides, G. M., Mathias, J. P., & Seto, C. T. (1991). Molecular Self-Assembly and Nanochemistry: a Chemical Strategy for the Synthesis of Nanostructures. *Science*, 254(5036), 1312–1319. <https://doi.org/10.1126/science.1962191>
70. Wu, S., Snajdrova, R., Moore, J. C., Baldenius, K., & Bornscheuer, U. T. (2021). Biocatalysis: Enzymatic Synthesis for Industrial Applications. *Angewandte Chemie - International Edition*, 60(1), 88–119. <https://doi.org/10.1002/anie.202006648>
71. Xie, J., Lee, J. Y., Wang, D. I. C., & Ting, Y. P. (2007). Silver Nanoplates: From Biological to Biomimetic Synthesis. *ACS Nano*, 1(5), 429–439. <https://doi.org/10.1021/nn7000883> CCC:
72. Xie, J., Zheng, Y., & Ying, J. Y. (2009). Protein-directed synthesis of highly fluorescent gold nanoclusters. *Journal of the American Chemical Society*, 131(3), 888–889. [https://doi.org/10.1021/JA806804U/SUPPL\\_FILE/JA806804U\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/JA806804U/SUPPL_FILE/JA806804U_SI_001.PDF)
73. Yáñez-Sedeño, P., Villalonga, R., & Pingarrón, J. M. (2019). Electroanalytical Methods Based on Hybrid Nanomaterials. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (pp. 1–22). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a9394.pub2>



74. Yushkova, E. D., Nazarova, E. A., Matyuhina, A. V., Noskova, A. O., Shavronskaya, D. O., Vinogradov, V. V., Skvortsova, N. N., & Krivoschapkina, E. F. (2019). Application of Immobilized Enzymes in Food Industry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(42), 11553–11567. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04385>
75. Zhang, S., Alberstein, R. G., De Yoreo, J. J., & Tezcan, F. A. (2020). Assembly of a patchy protein into variable 2D lattices via tunable multiscale interactions. *Nature Communications*, 11(1), 3770. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17562-1>

---

**Si desea citar nuestro artículo:**

Perez-Chirinos L, Guedes G, Saa L, L. Cortajarena A. Ingeniería de Proteínas: Innovaciones para Biomedicina, Biotecnología y Bioelectrónica. RACSG.2025;113(01):78-95. [rac.2025.113.1.org06](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1131-1_06)

## ORIGINAL

# DESDE VOLTA AL LITIO Y MÁS ALLÁ: UNA VISIÓN PERSONAL ACERCA DEL DESARROLLO DE LAS TECNOLOGÍAS DE BATERÍAS

## FROM VOLTA TO LITHIUM AND BEYOND: A PERSONAL VIEW ON BATTERY TECHNOLOGY DEVELOPMENT

M. Rosa Palacín<sup>1,2</sup>

1. Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB-CSIC), Campus de la UAB. Bellaterra (Barcelona)
2. Académica Correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España

### RESUMEN

Alessandro Volta inventó la pila en 1799 y ésta rápidamente evolucionó para integrarse en las aplicaciones de la época, como el telégrafo eléctrico. Sesenta años más tarde llegó la primera tecnología de baterías recargable (plomo/ácido), aún en uso hoy en día. Las baterías de ion litio, con energías específicas muy superiores a las tecnologías existentes hasta el momento, se desarrollaron gracias al conocimiento derivado del estudio de los compuestos de intercalación, que pueden integrar iones en su estructura cristalina sin que ésta sufra cambios significativos. Este concepto recibió el Premio Nobel de Química en 2019 y ha evolucionado mucho desde su comercialización a principios de los años 90 del siglo XX. Hoy en día, aparte de utilizarse en electrónica portátil también se emplean en vehículos eléctricos y su uso se contempla también para aplicaciones en la red eléctrica. La necesidad de disponer de más baterías y de mayor capacidad conlleva la necesidad de diversificar tecnologías y de que éstas sean cada vez más sostenibles. Uno de los conceptos que más rápidamente ha progresado son las baterías de ion sodio, en parte gracias a la similitud química con el de ion litio. Otras tecnologías que podrían dar lugar a elevadas energías específicas se basan en el uso de electrodos metálicos, pero los avances en prestaciones han sido hasta ahora más limitados.

**Palabras clave:** Materiales; Almacenamiento de energía; Baterías; Baterías de litio; Baterías de sodio.

### ABSTRACT

Alessandro Volta invented the battery in 1799 and the devices soon evolved to power the emerging technologies that were being developed at that time, such as the electric telegraph. Sixty years later, the first rechargeable battery technology (lead/acid) was conceived, which is still in use today. Rechargeable lithium ion batteries, which delivered much higher specific energies than the technologies available, were possible thanks to the knowledge developed in the study of intercalation compounds, which can accept ions without significant changes in their crystal structure. This concept was granted the Nobel in Chemistry in 2019 and has evolved a lot since its commercialization in the early 90s of the 20th century. Today, aside being used in portable electronics, it is also employed in electric vehicles and considered for other larger scale applications in the electric grid. The demand to have more batteries and for them to be larger in size has brought awareness of the need to diversify technologies and to make them more sustainable. One of the concepts that have progressed faster are sodium ion batteries, in part thanks to the chemical similarity with lithium ion. Other technologies that could lead to high specific energies rely on metals as electrode materials, but progress here has been to date more limited.

**Keywords:** Materials; Energy storage; Batteries; Lithium batteries; Sodium batteries.

Correspondencia

M. Rosa Palacín

Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB-CSIC), Campus de la UAB · 08193 · Bellaterra (Barcelona)

E-mail: rosa.palacin@icmab.es

## 1. INTRODUCCIÓN

Las baterías son dispositivos que permiten almacenar energía eléctrica en forma de energía química y consisten en una o más celdas electroquímicas conectadas. Cada celda está formada por dos electrodos que contienen materiales que pueden dar lugar a una **reacción redox** (reacción química que implica una transferencia de electrones entre los reactivos) y un electrolito, conductor de iones y aislante electrónico que está en contacto con ambos. El voltaje de una celda electroquímica viene determinado por la diferencia entre los potenciales de los dos electrodos, y la energía que puede almacenar es el producto del voltaje (en voltios) por la **capacidad electroquímica** de la celda (cantidad de corriente que puede proporcionar en un intervalo de tiempo determinado, habitualmente expresada en Ah o mAh). A veces se expresa como energía específica por unidad de masa o de volumen (Wh/kg o W/l). El funcionamiento de la celda se esquematiza en la figura 1. Durante la descarga

tiene lugar la reacción redox espontánea que involucra los dos electrodos, los electrones se transmiten de un electrodo a otro mediante un circuito externo y la carga se compensa mediante el transporte de iones en electrolito. Cuando uno de los materiales de electrodo se ha agotado, el flujo de electrones (corriente eléctrica) se interrumpe. Si la reacción redox es reversible, la batería puede recargarse aplicando una corriente externa en sentido inverso. Es común emplear los términos “secundaria” o “primaria” para referirse a baterías recargables o no recargables, respectivamente.

Si bien *a priori* podrían considerarse múltiples tecnologías de baterías basadas en diferentes combinaciones de materiales en los electrodos positivo y negativo, solamente algunas de ellas han resultado ser prácticamente viables y han llegado a comercializarse a gran escala. (Linden, 2001) En el presente artículo se describen su desarrollo histórico, el estado actual, y las perspectivas de evolución futura a juicio de la autora.

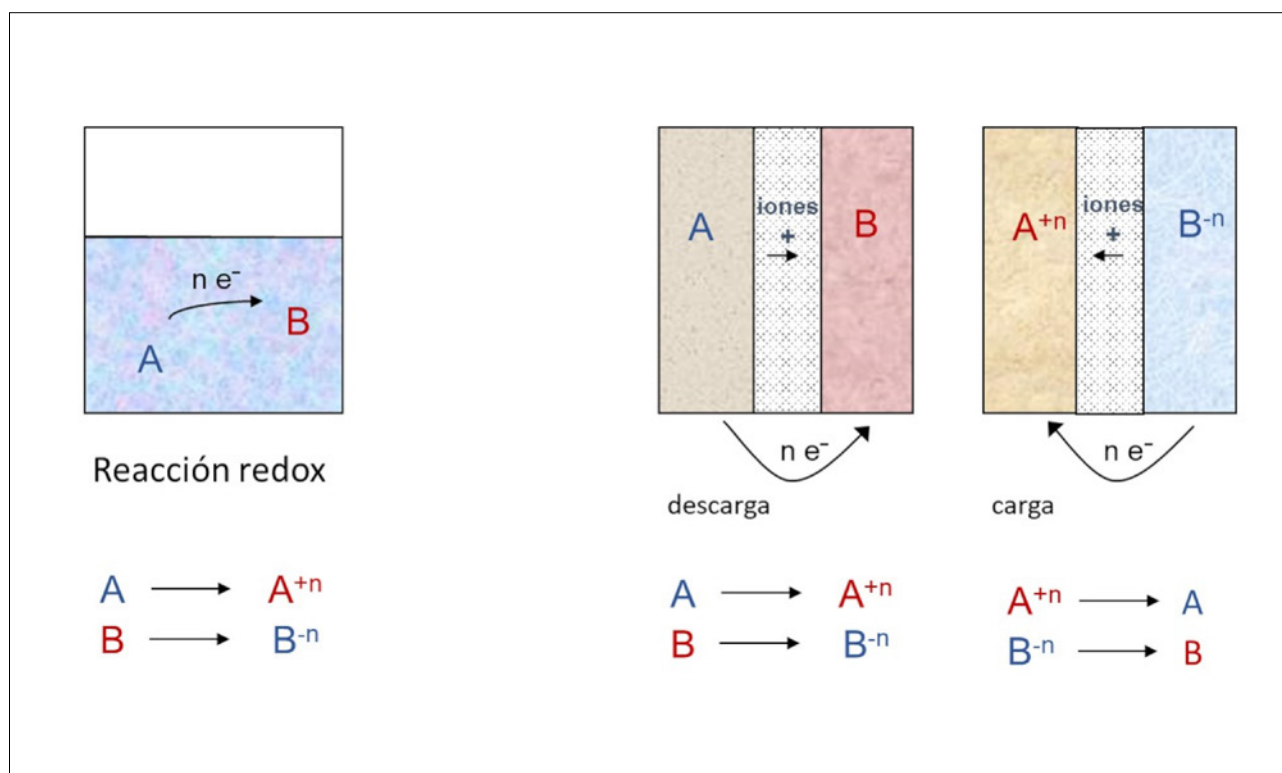


Figura 1. Izquierda: esquema de una reacción redox que involucra la transferencia de  $n$  electrones de la especie A (que se oxida resultando en  $A^{+n}$ ) a la especie B (que se reduce para dar lugar a  $B^{-n}$ ). A la derecha se muestra una batería basada en la misma reacción redox durante el proceso de descarga, así como el proceso de carga, suponiendo que la reacción sea reversible. El electrodo positivo (el de potencial más elevado) es el que contiene la especie A, mientras que el negativo (de menor potencial) contiene la especie B.

## 2. LAS PRIMERAS BATERÍAS

En 1799 Alessandro Volta demostró que se podía generar electricidad con un dispositivo fabricado apilando placas de diferentes metales separadas por una lámina de cartón o ropa mojada en agua salada. (Volta, 1800) Además de contribuir a refutar las teorías de Galvani sobre el origen animal de la electricidad, la denominada pila voltaica representó ya en su momento un hecho disruptivo, puesto que aparte del progreso del conocimiento científico, abría la posibilidad de generar electricidad a demanda, donde y cuando fuera menester.

Aunque comprensión del funcionamiento de la pila no llegó hasta 1890 con Nernst, la invención de Volta permitió a Humphry Davy aislar varios metales (sodio, potasio, magnesio, calcio, bario y estroncio) mediante electrólisis de sus sales fundidas utilizando una batería fabricada utilizando placas de Cu y Zn como electrodos.

Las mejoras en el diseño y arquitectura de las pilas resultaron en su aplicación práctica y fueron claves en el desarrollo del telégrafo durante la segunda mitad del siglo XIX (ver Figura 2), contribuyendo también los telegrafistas a su progreso y al desarrollo de nuevos sistemas. (Toca, 2019)

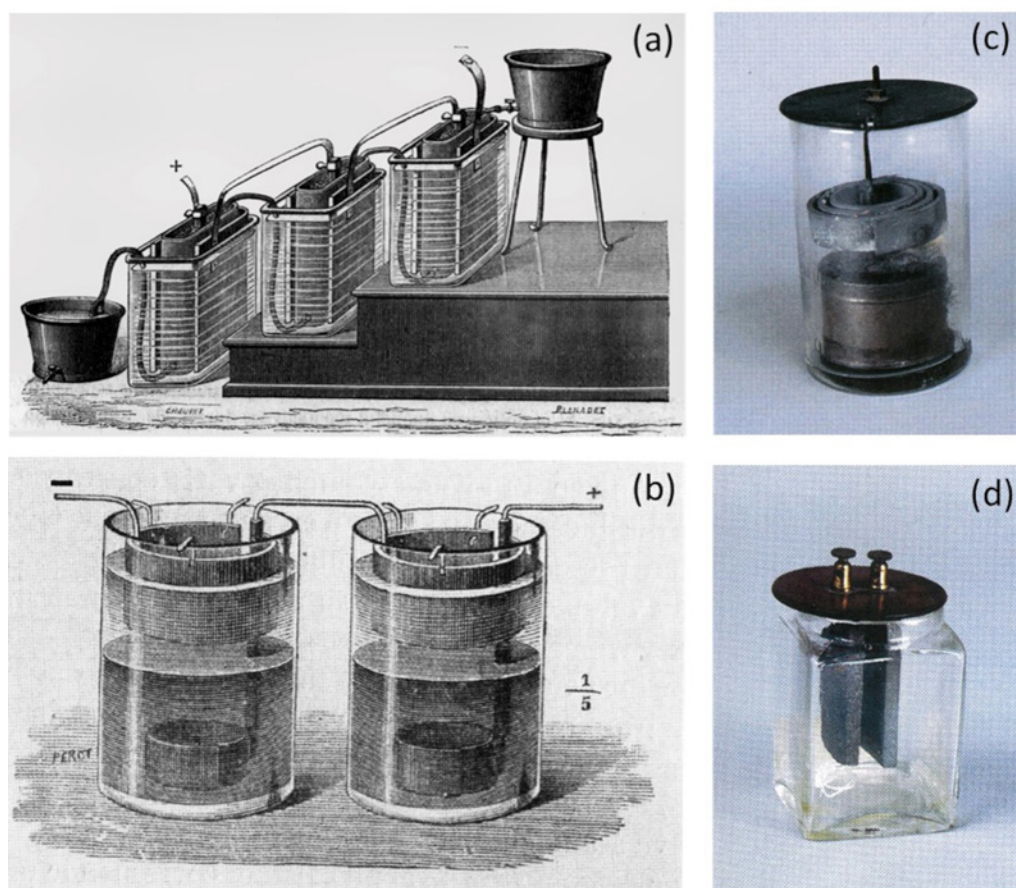


Figura 2. Baterías primarias (no recargables) desarrolladas y utilizadas en telegrafía. (a) Celdas de dicromato potásico, en una disposición diseñada por José Santiago Camacho para mejorar su duración (Engineer 1876, Sánchez-Miñana, 2010) (b) Pila Callaud, modificación de la Pila Daniell que proporcionaba una corriente más elevada (Wikipedia) (c) Pila de “óxido de cobre”, que consta de electrodos de Cu y Zn como la Pila Daniell pero utiliza un electrolito alcalino (d) Pila Fery, con electrodos de zinc y de carbón, siendo el oxígeno del aire la especie activa en el electrodo positivo y el electrolito cloruro amónico. Las pilas de tipo Callaud (Montillot, 1891) y Fery, junto con la Leclanché (con Zn y carbón mezclado con óxido de manganeso como electrodos y cloruro amónico como electrolito) fueron las más utilizadas en España. (Olivé, 2005)



El advenimiento de los sistemas secundarios (recargables) llegó con la batería de plomo/ácido, concebida por Wilhelm Josef Sinsteden en 1854 y desarrollada por Gaston Planté en 1859, que utiliza plomo en los dos electrodos: en uno de ellos el plomo metálico se oxida a Pb(II) y en el otro el Pb(IV) se reduce a Pb(II), siendo el electrolito una disolución de ácido sulfúrico. Una vez mejorada, esta tecnología empezó a emplearse no solamente en el telégrafo sino también en nuevas aplicaciones como la radio. Aún en día todavía se utiliza para el arranque de vehículos con motores de combustión interna, propulsar vehículos como sillas de ruedas, carritos de golf, pequeñas embarcaciones, etc y sistemas de alimentación ininterrumpida.

En paralelo al progreso en la tecnología de plomo, a principios del siglo XX Waldemar Jungner en Suecia y Thomas Edison en EE.UU. desarrollaron nuevos conceptos recargables (Ni/Cd y Ni/Fe respectivamente). Éstos utilizan hidróxido de níquel como electrodo positivo y un electrolito alcalino y tenían la ventaja de presentar una energía específica más alta y una vida útil más larga que los basados en plomo. Las baterías de níquel/cadmio todavía se emplean para algunas aplicaciones específicas, mientras que la tecnología de níquel/hidruro metálico (Ni/MH), que también utiliza hidróxido de níquel como electrodo positivo, se desarrolló en la década de 1990 y está presente en la actualidad en la mayoría de vehículos eléctricos híbridos no enchufables.

### 3. LA TECNOLOGÍA DE ION LITIO

Durante el siglo XIX, el progreso en el campo de la química fue enorme y el número de elementos descubiertos aumentó significativamente. El litio se descubrió en 1818 y fue aislado en estado metálico tres años más tarde, utilizando los métodos electroquímicos desarrollados por Davy. En 1913 se determinó que era el metal más electropositivo conocido, lo cual representaba un atractivo para su uso en baterías. Existían sin embargo varios inconvenientes prácticos a resolver, siendo el más evidente la necesidad de electrolitos estables en contacto con el litio, que reacciona violentamente con el agua para producir hidrógeno e hidróxido de litio. La disponibilidad generalizada de disolventes orgánicos llegó en los años 50 del siglo XX gracias al progreso de la industria química y en los años 60

tanto la NASA como otros laboratorios del gobierno de EE.UU. tenían ya programas de investigación sobre baterías de litio. Las baterías primarias (no recargables) utilizando litio metálico en el electrodo negativo y diversos materiales como electrodo positivo llegaron al mercado en la década de los 70, (Winter, 2018) primero para aplicaciones muy concretas en el ámbito aeroespacial o médico (marcapasos) y pronto también en pequeños dispositivos electrónicos (calculadoras, relojes, cámaras, etc.).

En la misma época, y en paralelo, se desarrolló el estudio de los denominados “compuestos de intercalación”, que tienen estructuras que son capaces de aceptar iones o moléculas “huéspedes” sin grandes reordenaciones de la red cristalina. Aparte del grafito, que se había estudiado ya con anterioridad, se demostró que varios sulfuros y óxidos con estructuras en capas podían intercalar iones y moléculas polares en su espacio interlaminar. Dado que la intercalación de especies cargadas puede inducirse electroquímicamente, pronto se consideró la posibilidad de utilizar compuestos de intercalación como materiales de electrodo en baterías de litio. Por una parte, los materiales que contienen metales de transición con varios estados de oxidación posibles deberían permitir reacciones redox asociadas a la intercalación reversible de iones de litio en su estructura. Por otro lado, dado que la intercalación/desintercalación de iones no induce modificaciones significativas en la estructura cristalina, estos compuestos deberían ser *a priori* adecuados para ser empleados en electrodos de baterías recargables y tolerar un gran número de ciclos de carga/descarga sin degradarse de forma relevante.

La investigación en esta temática se intensificó en el marco de la búsqueda de medios de propulsión alternativos para los vehículos de combustión interna, impulsada por un lado por la crisis del petróleo y por otro por la necesidad de reducir la contaminación del aire derivada de las emisiones provenientes del transporte, especialmente en Norteamérica. M. Stanley Whittingham y su equipo en los laboratorios de investigación de Exxon desarrollaron un prototipo de batería de 2V utilizando litio metálico en el electrodo negativo y  $\text{TiS}_2$  en el positivo mientras que Moli Energy en Canadá desarrolló un concepto análogo utilizando  $\text{MoS}_2$ , más barato que el  $\text{TiS}_2$ , porque se encuentra en la naturaleza. Por otro lado J. B. Goodenough propuso utilizar óxidos en lugar de sulfuros como

material de electrodo positivo, lo que daría lugar a un voltaje mucho mayor, cercano a los 4V.

El interés en estas tecnologías se intensificó gracias al emergente mercado de la electrónica portátil en Japón que requería baterías con alta energía específica y sin elementos tóxicos como el plomo o el cadmio. A mediados de la década de 1980, las baterías de litio parecían tener un futuro comercial brillante, pero pronto se determinó que durante el proceso de recarga el litio metálico no se depositaba uniformemente sobre el electrodo, sino que lo hacía en forma de filamentos llamados dendritas. Estas dendritas, podían atravesar el separador y crear un cortocircuito en la celda, con la consiguiente generación de calor y riesgo de explosión. Algunos incidentes de seguridad provocaron la retirada de las baterías de litio del mercado en 1989, hecho que propició la investigación para sustituir el litio metálico del electrodo negativo por aleaciones u otros compuestos de intercalación. Akira Yoshino, investigador de la empresa química Asahi Kasei en Japón, patentó en 1986 una batería que utilizaba un material a base de carbón como electrodo negativo y  $\text{LiCoO}_2$  en el electrodo positivo, cuya comercialización fue anunciada por Sony en febrero de 1990. Whittingham, Goodenough y Yoshino recibieron el Premio Nobel de Química 2019 por el desarrollo de las baterías de ion litio, que, en palabras del Comité Nobel: "han revolucionado nuestras vidas". (Nobel, 2020)

Los electrodos de las baterías de ion litio que se comercializan hoy en día están formados por láminas metálicas sobre los que se ha depositado una suspensión del material activo y aditivos (un polímero para favorecer la adhesión y mantener las propiedades mecánicas y carbón para mejorar la conductividad electrónica). En el caso del electrodo positivo se utiliza aluminio, en el caso del negativo debe emplearse cobre, más caro y más pesado, debido a que el litio forma aleaciones con el aluminio a bajo potencial. El separador es una lámina de polímero poroso impregnada en el electrolito (habitualmente una disolución 1 M de  $\text{LiPF}_6$  en una mezcla de carbonatos de alquilo). La energía específica de estas baterías (tanto gravimétrica como volumétrica) ha ido mejorando constantemente desde su comercialización gracias por un lado a los avances en la ingeniería de producto (desarrollo de separadores más delgados o contenedores más ligeros, entre otros) y por otro al desarrollo de materiales de electrodo con mejores

prestaciones.(Blomgren, 2017) En este sentido se ha explorado la reactividad redox un gran número de compuestos inorgánicos, algunos de las cuales han resultado presentar propiedades interesantes y se utilizan ya comercialmente como por ejemplo  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  y  $\text{LiFePO}_4$ , basados en metales de transición abundantes y de bajo coste; o también derivados de  $\text{LiCoO}_2$  donde parte del cobalto ha sido sustituido por níquel y manganeso ( $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$  con  $x+y+z=1$ , a menudo abreviado NMC). En algunas aplicaciones se utilizan también mezclas de materiales, un concepto desarrollado a nivel empírico con el objetivo de optimizar propiedades "aprovechando sinergias", que está empezando a entenderse desde el punto de vista fundamental gracias a la elucidación de las interacciones entre los materiales que componen la mezcla.(Chatzogiannakis, 2024) En cuanto al electrodo negativo, el grafito sigue siendo el material activo más comúnmente utilizado debido a su bajo potencial de operación y elevada capacidad; en algunos casos se añade silicio para aumentarla aún más, aunque en porcentajes pequeños para no penalizar la vida en número de ciclos.(Obrovac, 2014)

Hoy en día las baterías de ion litio son omnipresentes y en 2021 se comercializaron en una cantidad suficiente para almacenar casi 440.000 MWh de energía y por un valor de unos 76.000 millones de euros. (Pillot, 2022) Su mercado se ha ampliado con la electrificación del transporte y se está considerando también utilizarlas para aplicaciones en la red eléctrica. Esta expansión de su campo de aplicación implica un cambio de escala relevante desde los aproximadamente 10Wh de una única celda o los 50-100Wh de unas pocas celdas conectadas que alimentan un teléfono móvil o dispositivos electrónicos algo mayores respectivamente, a los kWh de los vehículos eléctricos o incluso los MWh de una batería instalada por Tesla en Australia.(Merano, 2023) Las aplicaciones a mayor escala implican la fabricación de módulos y "packs" que contienen un gran número de celdas conectadas y que están controlados por un cerebro electrónico, el sistema de gestión de la batería (Battery Management System, BMS) que recibe información de sensores de corriente, potencial y temperatura. Aparte de estos aspectos técnicos relacionados con el diseño, las nuevas aplicaciones conllevan también la necesidad de satisfacer requisitos más exigentes en términos de coste, duración y también sostenibilidad que representan nuevos retos para los que es necesario desarrollar nuevas soluciones.

#### 4. TECNOLOGÍAS ALTERNATIVAS

El crecimiento del mercado de la tecnología de baterías de ion litio ha promovido la concienciación sobre la gran cantidad de materias primas que se utiliza para fabricarlas y la necesidad de desarrollar procesos de producción eficientes tanto económica como medioambientalmente. Aparte del advenimiento de la economía circular, la diversificación de aplicaciones requerirá conceptos de batería diferentes y que tengan prestaciones adaptadas al uso específico, no sólo en relación a la energía que pueden almacenar y la potencia a la que pueden proveerla sino también en cuanto al coste y la duración en número de ciclos. Si el aspecto clave es la energía específica, la revolución podría venir del desarrollo de una tecnología basada en electrodos negativos metálicos, ya sea litio u otros. En aplicaciones en la red eléctrica, para las que los aspectos cruciales son el coste y la duración, las tecnologías basadas en elementos abundantes y/o de bajo coste parecen el camino a seguir.

La Figura 3 muestra un esquema de posibles conceptos de baterías alternativas al de ion litio. El caso más simple (panel izquierdo) sería una tecnología análoga con otros iones como portadores de carga, siendo el ejemplo más obvio las baterías de ion sodio, que se describen con más detalle en el siguiente apartado. Sin embargo, se podría pensar también en una posible tecnología de ion potasio, u otras basadas en la intercalación de iones con carga superior a +1, lo que haría necesario la intercalación de sólo la mitad o un tercio de los iones (si pensamos en carga +2 o +3) para conseguir la misma capacidad electroquímica. Por otra parte, el uso de electrodos metálicos basados en procesos de electrodeposición podría dar lugar a energías específicas muy elevadas, sobre todo si tienen potenciales estándar de reducción bajos. Éstos podrían emparejarse con materiales de electrodo positivo basados en procesos de intercalación o en mecanismos redox alternativos (panel central o derecho en la Figura 3) como el azufre y el oxígeno, que además presentan capacidades elevadas y bajo coste.

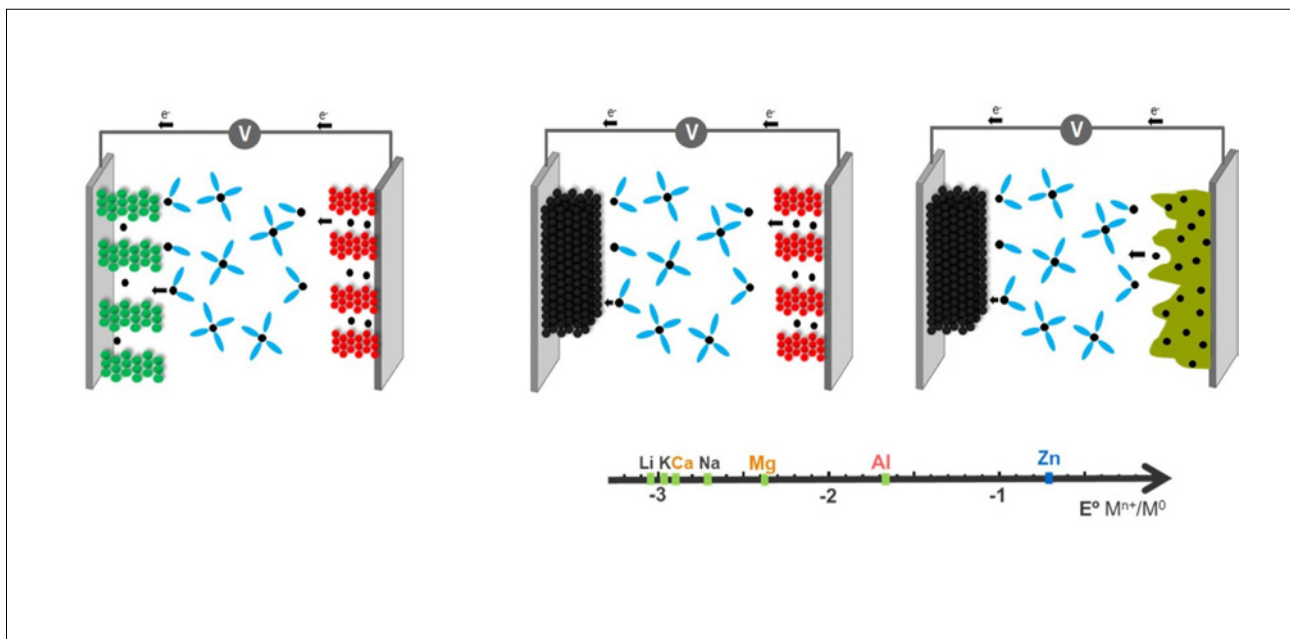


Figura 3. Esquema del funcionamiento de las baterías de ion litio o análogas con otros iones portadores de carga (izquierda) y de posibles tecnologías basadas en electrodos negativos metálicos, ya sea con un compuesto de intercalación como electrodo positivo (centro) como con un material con un mecanismo redox más complejo (derecha, verde oscuro) como por ejemplo el azufre. En rojo y verde se representan compuestos de intercalación que actúan como electrodo positivo y negativo, respectivamente. Los círculos negros representan los iones portadores de carga (por ejemplo  $\text{Li}^+$ ) y los óvalos azules las moléculas del disolvente del electrolito que los coordinan (los iones negativos presentes en el electrolito se han omitido por claridad). En la parte inferior se representa la escala de potenciales estándar de reducción para diversos metales susceptibles de ser utilizados como electrodos.

#### 4.1. La tecnología de ion sodio

Si bien la investigación en compuestos de intercalación abarcó desde sus inicios el estudio de diferentes especies huésped en las redes cristalinas anfitrionas, las perspectivas de desarrollar baterías la fueron focalizando en la intercalación de cationes. En la década de los 80 del siglo XX se logró la prueba de concepto de baterías basadas en la intercalación de iones  $\text{Na}^+$  utilizando diversos materiales de electrodo positivo como  $\text{TiS}_2$  o  $\text{Na}_x\text{CoO}_2$ . Sin embargo, la investigación en la temática se abandonó a principios de los años 90 y los esfuerzos se redirigieron a mejorar la tecnología de ion litio, que acababa de llegar al mercado.

Aproximadamente veinte años más tarde, a consecuencia tanto de las perspectivas de extender la aplicación de la tecnología de ion litio a campos más allá de la electrónica portátil, como del incremento de precios de las materias primas necesarias para su fabricación, el interés en las baterías de ion sodio empezó a resurgir. La posibilidad de desarrollarlas a gran escala basadas en elementos abundantes y materias primas de bajo coste (empezando por el propio sodio en sustitución del litio), propició el renacimiento de la actividad investigadora. La similitud química entre el sodio y el litio hizo que esta investigación diera frutos rápidamente, ya que se aprovechó el conocimiento acumulado en el desarrollo de la tecnología de ion litio, químicamente similar. Desde un punto de vista práctico, las baterías de ion sodio podrían fabricarse empleando las líneas de producción de baterías de ion litio existentes y tendrían una ventaja añadida, la posibilidad de utilizar colectores de corriente de aluminio, más ligero y barato que el cobre, tanto para el electrodo positivo como para el negativo (ya que el sodio, a diferencia del litio, no forma aleaciones con el aluminio a bajo potencial). En este contexto se exploraron materiales de electrodo y formulaciones de electrolito diversas, tal y como había sucedido unos años antes en el caso del litio. Los objetivos eran los mismos, encontrar compuestos capaces de reaccionar de forma reversible con la mayor cantidad posible de iones a potenciales adecuados, es decir, lo más bajos posible para el caso del electrodo negativo (el potencial estándar de reducción del metal puro sería el límite), y lo más altos posible para el electrodo positivo; para maximizar el voltaje de las celdas. Así, esta tecnología se ha diversificado en familias que utilizan diferentes materiales en el electrodo positivo y presentan prestaciones complementarias. (Hasa, 2021). Los

compuestos de tipo  $\text{Na}_x\text{MO}_2$ , con estructura laminar y donde M representa distintos metales de transición (a menudo con un porcentaje elevado de manganeso) tienen una estructura análoga a la de  $\text{LiCoO}_2$  y son ampliamente utilizados porque dan lugar a energías específicas más elevadas. El fluorofosfato de vanadio y sodio presenta una cinética de reacción muy rápida que mejora las prestaciones en potencia y los materiales derivados del Azul de Prusia ( $\text{Na}_2\text{Fe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ) han demostrado también dar lugar a prestaciones interesantes ya que su estructura cristalina tridimensional es adecuada para la intercalación de iones de radio relativamente grande, como el  $\text{Na}^+$  o el  $\text{K}^+$ . En el electrodo negativo se utiliza carbón duro (no grafitizable) puesto que el grafito no intercala iones  $\text{Na}^+$ .

El progreso ha sido rápido (Figura 4) y a día de hoy, la tecnología de baterías de ion sodio se está empezando a introducir en el mercado gracias a la actividad no sólo de compañías pequeñas de tipo **start-up** (como por ejemplo Faradion en Reino Unido, Tiamat en Francia o HiNa en China) sino también de grandes corporaciones (CATL en China). Su uso se contempla para aplicaciones muy diversas desde herramientas eléctricas (Leroy-Merlin) a otras a mayor escala como el transporte o la red eléctrica (Hu, 2021, Rudola, 2023) y deben considerarse no una tecnología competidora, sino complementaria a la de ion litio. (Tarascon, 2020).

#### 4.2. Otras tecnologías basadas en compuestos de intercalación

El éxito de las baterías de ion sodio lleva a plantear la posible viabilidad de otras tecnologías de baterías basadas en iones alternativos. En el caso del potasio existe ya una empresa que anuncia su fabricación (Group1, 2024) utilizando grafito (que sí intercala iones  $\text{K}^+$ ) en el electrodo negativo y derivados del Azul de Prusia en el positivo. En este contexto, sería conveniente investigar el comportamiento de nuevos compuestos que contengan potasio y un metal de transición para determinar si presentan actividad redox reversible asociada a la desintercalación de iones  $\text{K}^+$  de la red cristalina.

Por otro lado, sería interesante explorar tecnologías análogas basadas en metales que formen iones multivalentes, como el zinc, el aluminio, el magnesio o el calcio. Si además fuera posible utilizar electrodos metálicos, las energías específicas que se obtendrían serían mucho mayores.

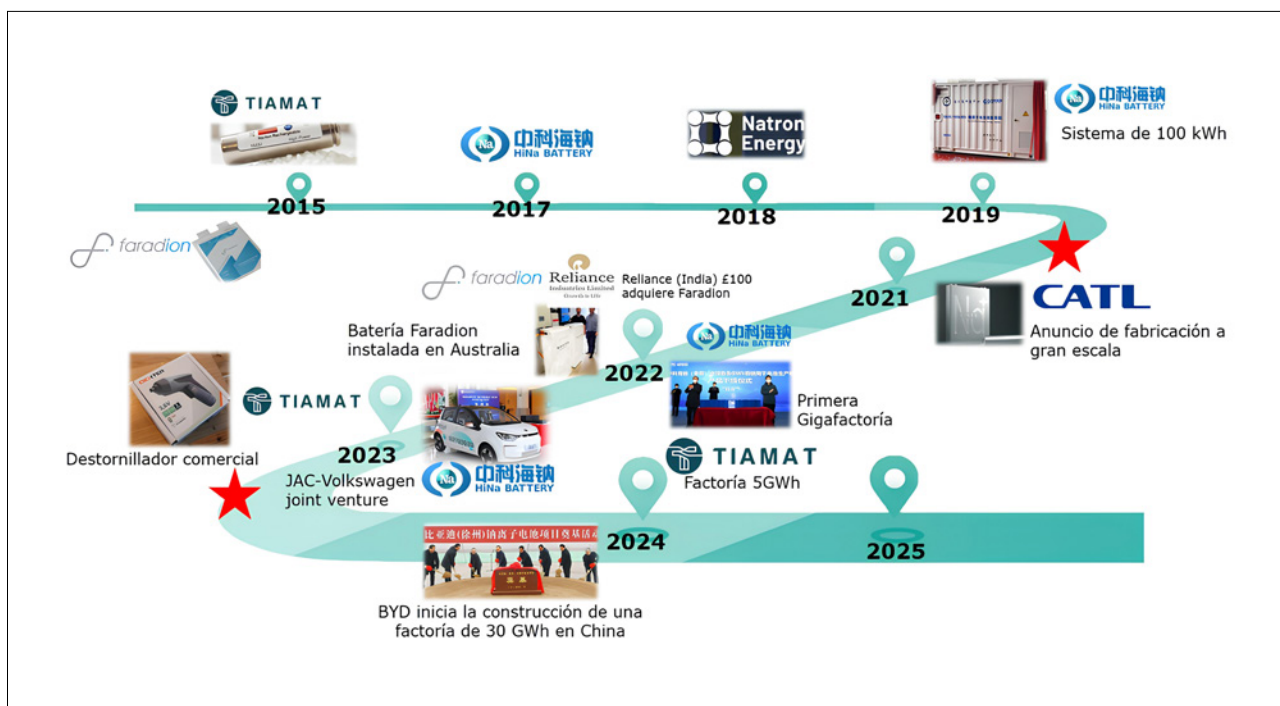


Figura 4. Esquema temporal de la industrialización de la tecnología de baterías de ion sodio con mención de las principales empresas implicadas. En rojo se marcan dos hechos disruptivos: el primer anuncio de fabricación a gran escala por parte de CATL y la disponibilidad de un producto comercial. (Cortesía de Montse Galcerán, CIC Energigune)

### 4.3. Tecnologías basadas en electrodos metálicos

Aunque desde la pila de Volta se han utilizado diversos metales como materiales de electrodo, en la actualidad casi todas las tecnologías comerciales que los emplean son primarias (como por ejemplo Zn/MnO<sub>2</sub>). Los problemas de seguridad relacionados con la formación de dendritas durante la electrodeposición limitaron el desarrollo comercial de las baterías secundarias basadas litio metálico pero la investigación continuó a nivel de laboratorio. Las tecnologías Li/S y Li/aire (o más estrictamente Li/O<sub>2</sub>) (Bruce, 2012) son particularmente atractivas ya que los materiales de electrodo positivo son ligeros, abundantes y de bajo coste, y además podrían dar lugar a una capacidad electroquímica muy elevada y energías específicas mucho mayores que las que pueden alcanzarse con la tecnología de ion litio. Sin embargo, su desarrollo presenta, además del problema del crecimiento dendrítico en el electrodo negativo, otros retos ligados al electrodo positivo. En el caso del azufre, y aparte de su carácter aislante que puede mitigarse fabricando electrodos nanocompuestos con grafito u otros tipos de carbón, la reducción implica la formación de especies iónicas (polisulfuros) que son solubles en el

electrolito, lo cual provoca una rápida pérdida de capacidad de la batería. En el caso del oxígeno, no sólo es necesario emplear catalizadores que faciliten su reducción (tal y como ocurre en las pilas de combustible), sino que el proceso de oxidación de los productos formados (como el peróxido de litio) debe también ser eficiente. Las reacciones que tienen lugar en el electrodo de oxígeno son complejas y a menudo se forman radicales que reaccionan con el electrolito, lo que hace que hoy en día la investigación en este concepto se oriente a clarificar los mecanismos de reacción y cómo pueden modularse mediante cambios en el catalizador y la composición del electrolito.

Una tecnología alternativa basada en la electrodeposición de litio son las baterías con electrolito sólido, ya que *a priori*, y teniendo en cuenta aspectos puramente mecánicos, cabría esperar que el crecimiento dendrítico estuviera limitado. En el caso de los electrolitos poliméricos el progreso ha sido más rápido, y la empresa Blue Solutions (Blue) las fabrica y empleó, por ejemplo, en el Autolib, un servicio de *cars-haring* que se implementó en París en 2011 y desapareció en 2023. Algunos fabricantes de vehículos han anunciado la futura implementación de baterías

de estado sólido, en algún caso con electrolitos basados en materiales inorgánicos, pero las fechas se han ido retrasando debido a los retos que todavía no se han superado. Éstos están relacionados con la compatibilidad entre los diferentes componentes de la batería (algunos conductores iónicos se reducen en contacto con el litio metálico) y a la dificultad de mantener un buen transporte iónico a través de las interfases sólido/sólido. Otros requisitos a satisfacer a nivel práctico son el mantenimiento de una cierta presión durante la operación de la batería para asegurar un buen contacto eléctrico, o una temperatura elevada ( $\sim 70^{\circ}\text{C}$  para los electrolitos poliméricos) para favorecer la conductividad iónica del electrolito.

Tanto el sodio como el potasio presentan, como en el caso del litio, tendencia a electrodeponerse formando dendritas, lo cual limita su uso como materiales de electrodo. Sin embargo, en el caso del sodio, que funde a  $98^{\circ}\text{C}$ , se ha desarrollado la tecnología Na/S que opera a temperaturas cercanas a los  $300^{\circ}\text{C}$  y emplea electrodos líquidos y un electrolito sólido: la “ $\beta$ -alúmina” ( $3\text{Na}_2\text{O}\cdot 16\text{Al}_2\text{O}_3$ ), patentada en 1966 por investigadores de la Ford Motor Company. Este concepto se comercializó, sobre todo en Japón de la mano de NGK, y todavía hoy en día se utiliza para

almacenamiento de energía en la red eléctrica.(Hueso, 2013) Existe una tecnología similar, que en lugar de azufre líquido utiliza  $\text{NiCl}_2$  sólido como material de electrodo y que se comercializa para aplicaciones alternativas muy específicas.(fzsonick)

La viabilidad de utilizar otros metales como electrodos vendrá determinada por la del proceso de electrodeposición, que deberá ser eficiente no propiciar el crecimiento dendrítico. La Figura 5 muestra algunas propiedades de metales que podrían considerarse como electrodos en tecnologías de baterías recargables.(Bitenc, 2020) El hierro, el zinc, el cadmio y el plomo darían lugar a energías específicas relativamente bajas. Aún así, el zinc y el hierro, que tienen la ventaja de no ser tóxicos como el cadmio o el plomo, son interesantes por su bajo coste. En el caso del zinc, que presenta un potencial estándar de reducción menor y por lo tanto más interesante, se han dedicado muchos esfuerzos a transformar en recargable la tecnología Zn/MnO<sub>2</sub> (Parker, 2018) pero la viabilidad de esta estrategia es aún incierta debido no sólo a la tendencia al crecimiento dendrítico sino también a la corrosión del electrodo de Zn (especialmente si el pH del electrolito no es lo suficientemente alcalino). Por otro lado, el mecanismo redox en el electrodo positivo es todavía controvertido.

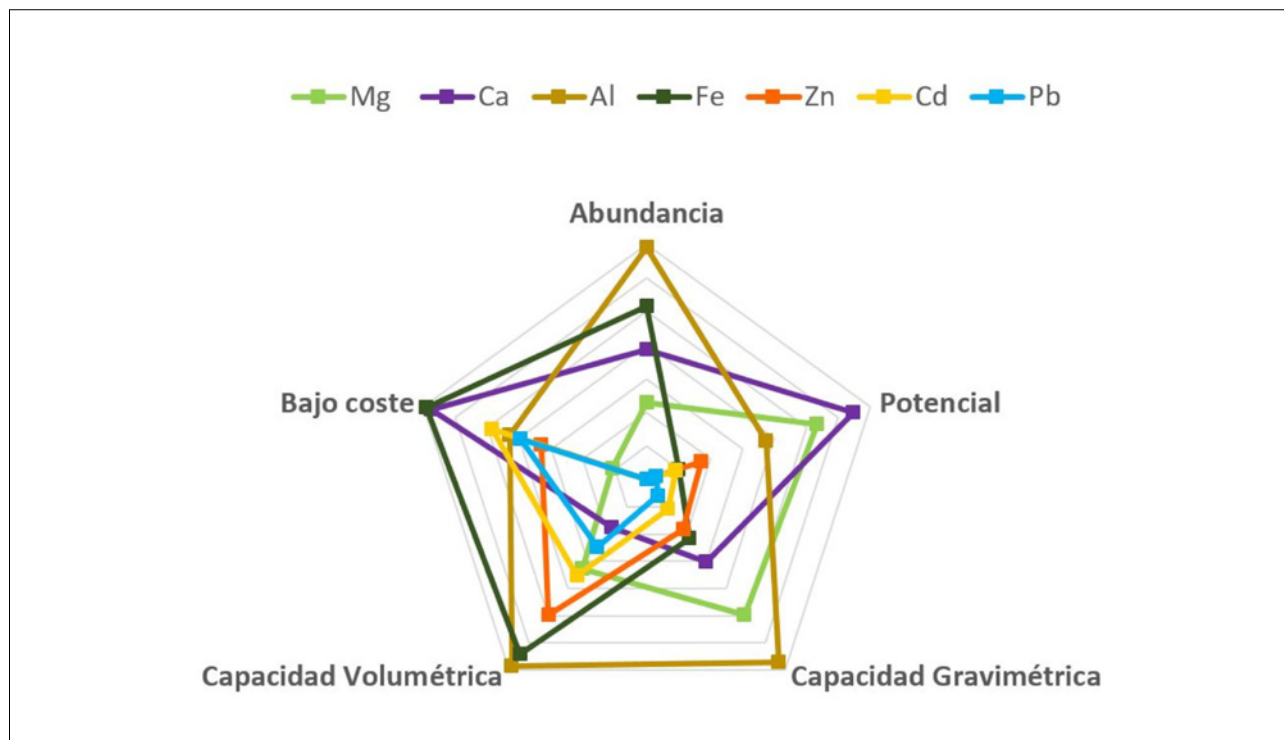


Figura 5. Comparativa de las propiedades de diversos metales que podrían utilizarse como electrodo negativo en baterías recargables.



Otros metales como el magnesio, el calcio, o el aluminio, que son también de bajo coste y muy abundantes en la corteza terrestre, tienen potenciales estándar de reducción demasiado bajos para poder electrodeponerse en electrolitos acuosos y es necesario usar disolventes orgánicos. Si bien algunos de estos metales se han utilizado en baterías primarias (aluminio/aire), el interés en desarrollar tecnologías secundarias es más reciente. La prueba de concepto de una batería recargable basada en magnesio metálico como electrodo negativo se demostró en el año 2000 utilizando un electrolito corrosivo y con una estabilidad limitada, lo cual obligó a emplear un material de electrodo que opera a bajo potencial ( $\text{Mo}_6\text{S}_8$ ) y presenta una capacidad relativamente baja. (Aurbach, 2000) Casi 25 años después de este avance, y pese a los progresos realizados, las baterías recargables de magnesio están todavía muy lejos de poder comercializarse. Aunque se han desarrollado tanto electrolitos más estables y menos corrosivos como materiales de electrodo con capacidades interesantes (azufre, otros sulfuros o compuestos orgánicos), los prototipos que se han podido fabricar presentan energías específicas muy bajas. (Blázquez, 2023) En el caso de los conceptos basados en calcio, la electrodeposición en medio orgánico se consiguió en 2015 y, aunque el electrolito es estable a potenciales altos, es necesario todavía mejorar la eficiencia del proceso y desarrollar materiales de electrodo positivo con buenas prestaciones. (Arroyo-de Dompablo, 2020) El mecanismo de las baterías que emplean aluminio en el electrodo negativo es aún más complejo. En 2015 se propuso una tecnología recargable empleando aluminio metálico como electrodo negativo y grafito como electrodo positivo que da lugar a una energía específica muy baja debido a la participación del electrolito, un líquido iónico corrosivo, en la reacción redox. (Lin, 2015)

En resumen, si bien los conceptos descritos en los apartados anteriores son prometedores por su previsible bajo coste y podrían ser una opción para el almacenamiento de energía a gran escala, existen trabas importantes para su desarrollo. A día de hoy, la investigación en tecnologías de baterías basadas en metales multivalentes es de carácter fundamental. El estudio de nuevos electrolitos y materiales de electrodo debería llevar en un futuro próximo a determinar qué conceptos son susceptibles de derivar en productos comerciales porque cumplen los requisitos en cuanto a coste, prestaciones y sostenibilidad (que pueden diferir significativamente en función de la aplicación) y cuáles, a pesar del interés académico, deberán permanecer como curiosidad de laboratorio.

## 5. CONCLUSIÓN

A lo largo de la historia, el desarrollo de las baterías ha estado guiado por dos criterios principales y complementarios: satisfacer la curiosidad científica de los investigadores y alimentar los nuevos dispositivos que se han ido desarrollando gracias al progreso tecnológico. Más recientemente se ha añadido también la necesidad de diversificar conceptos no solamente para adaptarlos a los requerimientos de cada aplicación específica sino también para evitar el uso de materiales críticos y ampliar el espectro de materias primas empleadas.

La investigación hoy en día se centra en las baterías recargables. Si bien las más tradicionales y de bajo coste como la plomo/ácido siguen en uso, las baterías de ion litio se han convertido en la tecnología dominante y abarcan no solamente el campo de la electrónica portátil sino también el de la electrificación del transporte, y se consideran incluso para almacenamiento en la red eléctrica. Existe sin embargo una gran variedad de conceptos alternativos que se han investigado a nivel de laboratorio. El más relevante en cuanto a madurez es la tecnología de ion sodio, habiendo la analogía con el ion litio impactado muy favorablemente en su desarrollo. Es posible que en un futuro cercano se logren progresos similares para el caso del ion potasio, aunque el abanico de materiales activos adecuados para ser utilizados en el electrodo positivo es por el momento limitado.

El desarrollo de baterías con electrodos metálicos es muy interesante de cara a obtener energías específicas elevadas pero el cuello de botella es lograr un proceso de electrodeposición eficiente y sin crecimiento dendrítico. En el caso del litio el uso de electrolitos sólidos parece el camino a seguir. Existen baterías de sodio con electrolito sólido y electrodos líquidos que se emplean con éxito para aplicaciones en la red eléctrica. Las tecnologías basadas en metales multivalentes son diversas, en el caso del Zn, que puede electrodeponerse en medio acuoso, se ha progresado mucho pero aún no se han comercializado sistemas secundarios, para el Mg, el Ca o el Al el grado de desarrollo es inferior y de momento los esfuerzos se centran en desarrollar pruebas de concepto y prototipos.

En resumen, la investigación actual se orienta por una parte a la mejora de las prestaciones de las tecnologías comerciales, como la de ion litio, y por otra a



la exploración de materiales para desarrollar nuevos conceptos. Si bien es previsible que algunos no lleguen a la comercialización por no poder satisfacer los requisitos necesarios (prestaciones, coste, sostenibilidad, etc.) otros están ya empezando a penetrar en el mercado (ion sodio). La diversificación de aplicaciones propiciada por la transición energética conllevará seguramente un desarrollo *ad hoc* de baterías adaptando las prestaciones a las necesidades específicas de cada caso, de manera que es de esperar que la actividad investigadora se incremente y pueda nutrirse de los avances en ámbitos novedosos, como por ejemplo el de la ciencia de datos y la inteligencia artificial. (Vegge 2021, Carnevali, 2024)

## AGRADECIMIENTOS

La autora agradece encarecidamente a Montse Galceran (CIC Energigune) la provisión y el permiso de reproducción de la Figura 4 y a Ángel Toca, Jesús Sánchez Miñana, y Vicente Rubio (Presidente de la Asociación de Amigos del Telégrafo) la información proporcionada sobre las baterías utilizadas en telegrafía y la autorización para reproducir las imágenes que se muestran en la Figura 2.

## CONFLICTO DE INTERESES

La autora de este artículo declara no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aurbach, D. et al. (2000) Prototype systems for rechargeable magnesium batteries" Nature, 407, 724-727 <https://doi.org/10.1038/35037553>
2. Arroyo-de Dompablo, M.E. et al. (2020) Achievements, Challenges, and Prospects of Calcium Batteries" Chem. Rev.120, 14, 6331-6357. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.9b00339>
3. Bitenc, J. et al. (2020) Multivalent charge carriers, Batteries,: Present and Future Energy Storage Challenges (Encyclopedia of Electrochemistry) <https://doi.org/10.1002/9783527610426.bard110020>
4. Blázquez, A. (2023) A practical perspective on the potential of rechargeable Mg batteries" Energy Environ. Sci.16, 1964-1981. <https://doi.org/10.1039/D2EE04121A>
5. Blomgren, G.E. (2017) The Development and Future of Lithium Ion Batteries" J. Electrochem. Soc.164, 1, A5019-A5025. <https://doi.org/10.1149/2.0251701jes>
6. Blue <https://www.blue-solutions.com/en/battery-technology/>
7. Bruce, P.G. et al. (2012) Li-O<sub>2</sub> and Li-S batteries with high energy storage" Mater.11, 19-29. <https://doi.org/10.1038/nmat3191>
8. Carnevali, A. et al. (2024) VOLTA: A tool for battery screening bridging the gap between virtual electrode materials and practical applications Energy Storage Mater. 67, 103254. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103254>
9. Chatzogiannakis, D. et al. (2024) Understanding charge transfer dynamics in blended positive electrodes for Li-ion batteries Energy Storage Mater.69, 103414. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103414>
10. The Engineer 22/11/1876, 203.
11. Fzsonick [www.fzsonick.com](http://www.fzsonick.com) [Consulta: 16 diciembre 2024]
12. Group 1, (2024) <https://www.prnewswire.com/news-releases/group1-unveils-first-potassium-ion-battery-in-18650-format-302211876.html> [Consulta: 16 diciembre 2024]
13. Hasa et al. (2021) Challenges of today for Na-based batteries of the future: From materials to cell metrics" J. Power Sources.482, 228872. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228872>
14. Hu, Y.S. & Li, Y. (2021) Unlocking Sustainable Na-ion Batteries into Industry ACS Energy Lett.6, 4115-4117. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.1c02292>



15. Hueso et al. (2013) High temperature sodium batteries: status, challenges and future trends *Energy Environ. Sci.* 6, 734-749. <https://doi.org/10.1039/C3EE24086J>
16. <https://www.leroymerlin.fr/produits/outillage/outillage-electroportatif/visseuse-et-tournevis-electrique/visseuse/tournevis-sans-fil-dexter-sodium-3-6-v-0-7-ah-86650845.html> [Consulta: 16 agosto 2024]
17. Lin, M.C. et al. (2015) An ultrafast rechargeable aluminium-ion battery" *Nature*. 520, 324-328. <https://doi.org/10.1038/nature14340>
18. Linden & Reddy (2001) *Handbook of batteries*. McGraw-Hill
19. Merano, 2023M. 150MW/300MWh Tesla Megapack system in Australia goes live <https://www.teslarati.com/edify-tesla-megapack-150mw-300mwh-system/> [Consulta: 30 diciembre 2024]
20. Montillot, L. La Telegrafía actual en Francia y en el Extranjero en 1889 p. 58. Editado en Madrid en 1891. [https://issuu.com/mnactec/docs/a\\_621.394\\_mon](https://issuu.com/mnactec/docs/a_621.394_mon)
21. NobelPrize.org, 2020 Scientific Background: Lithium-ion batteries. Advanced information.. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/advanced-information/> [Consulta: 11 diciembre 2024]
22. Obrovac, M.N. & Chevrier, V.L (2014) Alloy negative electrodes for Li-ion batteries, *Chemical reviews* 114 (23) 11444-11502 <https://doi.org/10.1021/cr500207g>
23. Olivé, S. et al. (2005) 150 Aniversario del Telégrafo en España. Catálogo de la exposición celebrada con motivo del 150 aniversario del telégrafo en España organizada por Correos y la Asociación de Amigos del Telégrafo.
24. Parker J.F. et al. (2018) Translating Materials-Level Performance into Device-Relevant Metrics for Zinc-Based Batteries *Joule*. 2, 12, 2519-2527. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.11.007>
25. Pillot, C. (2022) The rechargeable battery market and main trends 2020-2030 Batteries Event 2022 Lyon.
26. Rudola, A. et al. (2023) Opportunities for moderate-range electric vehicles using sustainable sodium-ion batteries" *Nat. Energy*. 8, 215-218. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01215-w>
27. Sánchez Miñana, J. (2010) Los inventos de José Santiago Camacho (1846-1878): noticia de un electricista olvidado, *Quaderns d'història de l'enginyeria*, XI, 221-39. <http://hdl.handle.net/2099/10282>
28. Tarascon, J.M. (2020) Na-ion versus Li-ion Batteries: Complementarity Rather than Competitiveness" *Joule*. 4, 1613-1620. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.06.003>
29. Toca, A. (2019) Este precioso instrumento que al fin no se ha inventado para adornar escaparates. Las pilas en el Sistema telegráfico español del siglo XIX". *Actes d'història de la Ciència i de la Tècnica (Nova Època)*, 12-13, 51-84. DOI: 10.2436/20.2006.01.215
30. Vegge, T. (2021) Toward Better and Smarter Batteries by Combining AI with Multisensory and Self-Healing approaches. *Adv. Energy. Mat.* 11, 2100362. <https://doi.org/10.1002/aenm.202100362>
31. Volta, A. (1800) On the Electricity excited by the mere Contact of conducting Substances of different Kinds *Philos. Trans. R. Soc. London* 90, 403-431. <https://doi.org/10.1098/rstl.1800.0018>
32. [https://es.wikipedia.org/wiki/Pila\\_Daniell#Modificaci%C3%B3n\\_de\\_Callaud:\\_la\\_celda\\_de\\_gravedad](https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_Daniell#Modificaci%C3%B3n_de_Callaud:_la_celda_de_gravedad) [Consulta: 23 diciembre 2024]
33. Winter, M. et al. (2018) Before Li Ion Batteries *Chem. Rev.* 118, 23, 11433-11456. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00422>

---

#### Si desea citar nuestro artículo:

Palacín MR. Desde Volta al litio y más allá: una visión personal acerca del desarrollo de las tecnologías de baterías. *RACSG*. 2025;113(01):96-107. [rac.2025.113.1.org07](https://doi.org/10.1002/rac.2025.113.1.org07)

**ORIGINAL**

# **INVASIONES BIOLÓGICAS POR ESPECIES EXÓTICAS**

## BIOLOGICAL INVASIONS BY NON-NATIVE SPECIES

**Montserrat Vilà<sup>1, 2, 5</sup>; Belinda Gallardo<sup>3</sup>; Pablo González-Moreno<sup>4</sup>**

1. Estación Biológica de Doñana (EBD), Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Sevilla.
2. Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Sevilla, Sevilla.
3. Instituto Pirenaico de Ecología (IPE), Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Zaragoza.
4. Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Córdoba, Córdoba.
5. Académica correspondiente de la RAC.

### **RESUMEN**

La introducción de especies exóticas constituye un fenómeno de cambio global impulsado directa o indirectamente por las actividades humanas. Muchas especies exóticas se introducen por sus usos, muchas veces estéticos, tal es el caso de las plantas ornamentales o las mascotas. También pueden llegar como polizones o contaminantes de productos comerciales, o sencillamente dispersarse a través de grandes vías de transporte que conectan áreas geográficas originalmente aisladas. El establecimiento y posterior expansión de las especies exóticas puede dar lugar a invasiones biológicas, cuyo desarrollo depende tanto de los rasgos biológicos de las especies, como de que encuentren unas condiciones ambientales favorables en el área de introducción. Las especies invasoras ocasionan impactos en la biodiversidad y en las propiedades de los ecosistemas nativos. En consecuencia, modifican los servicios ambientales que la naturaleza nos brinda y afectan a nuestra calidad de vida mediante cambios que pueden repercutir en la salud pública y en sectores socioeconómicos como la agricultura, la pesca o el turismo. Para paliar los impactos que ocasionan, las medidas de gestión más efectivas deben contemplar la prevención y la detección precoz de especies exóticas potencialmente invasoras.

**Palabras clave:** Cambio global; Comercio; Impactos ecológicos; Introducción de especies.

### **ABSTRACT**

The introduction of alien species constitutes a global change phenomenon promoted directly or indirectly by human activities. Many alien species are introduced for specific purposes, often aesthetic, such as ornamental plants or as pets. They can also arrive as stowaways or contaminants of commercial products, or simply disperse through large transportation pathways that connect previously isolated geographical areas. The establishment and subsequent expansion of exotic species can lead to biological invasions, which depends both on the species biological traits and on whether they find favorable environmental conditions in the area of introduction. Invasive species have an impact on biodiversity and the properties of native ecosystems. Consequently, they modify the environmental services that nature provides, and affect our quality of life through changes that can affect public health and socioeconomic sectors such as agriculture, fisheries or tourism. To mitigate these impacts, the most effective management measures must include the prevention and early detection of potentially invasive alien species.

**Keywords:** Global change; Trading; Ecological impacts; Species introduction.

Correspondencia

Montserrat Vilà

Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España

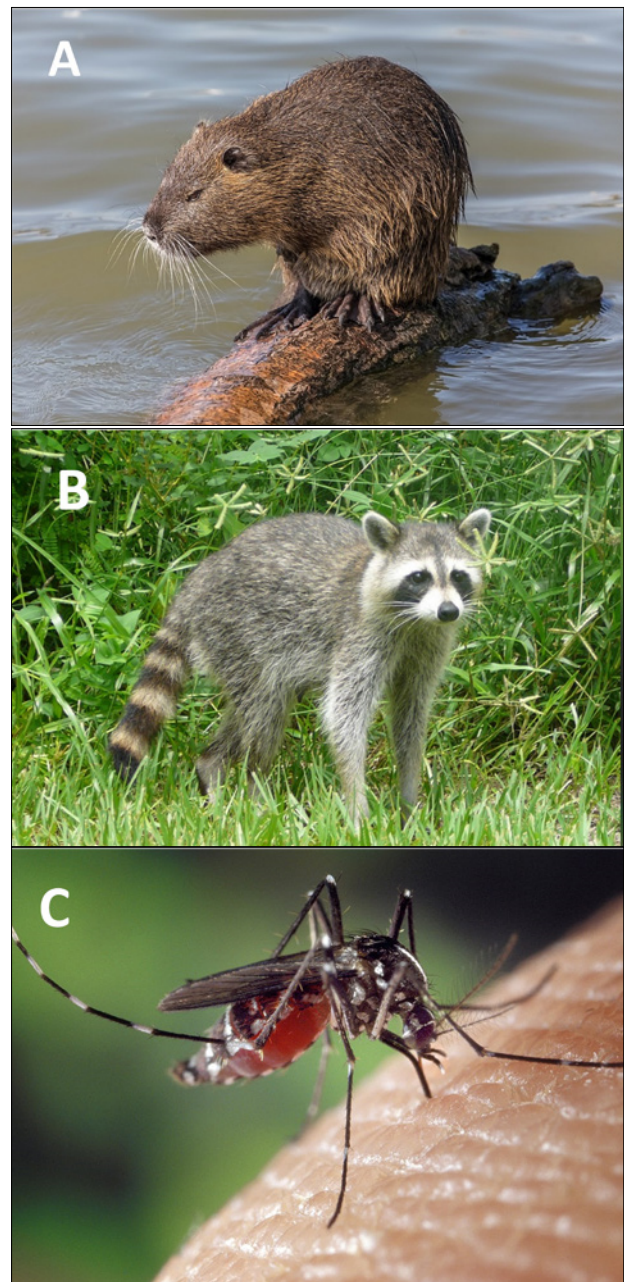
Calle Valverde, 22 · 28004 · Madrid, España

E-mail: montse.vila@ebd.csic.es

## INTRODUCCIÓN

La flora, la fauna y la microbiota de cualquier país contiene especies que han sido introducidas directa o indirectamente por el ser humano. Tal es el caso de la cotorra de Kramer – *Psittacula krameri* –, el mosquito tigre – *Aedes albopictus* –, la avispa asiática – *Vespa velutina* –, el rabo de gato – *Cenchrus setaceus* –, el mejillón cebra – *Dreissena polymorpha* –, el coipú – *Myocastor coypus* –, el jacinto de agua – *Eichhornia crassipes* –, o el picudo rojo de las palmeras – *Rhynchophorus ferrugineus* –, por citar algunos ejemplos de especies exóticas introducidas en España en las últimas décadas (Figura 1, Tabla I). Todas estas especies, de no ser por el transporte humano, jamás habrían llegado por sus propios medios. Además, se consideran especies exóticas invasoras, puesto que poseen la facultad de expandirse muy rápidamente, y de causar impactos ambientales o socioeconómicos preocupantes. La tasa de entrada de nuevas especies exóticas en regiones donde nunca se habrían dispersado de forma natural, sigue un curso exponencial. Durante las últimas décadas, el establecimiento de especies exóticas de todos los grupos taxonómicos se ha acelerado, principalmente debido a la expansión e intensificación de las vías de comunicación como consecuencia del comercio global (Seebens et al, 2017). La mayoría de las especies exóticas no se mueven del área donde fueron introducidas, pero algunas se reproducen exitosamente, sus descendientes se establecen lejos de donde sus progenitores fueron introducidos, y se expanden a gran velocidad. Este fenómeno, denominado invasión biológica, ha cobrado relevancia como un componente más del cambio global. Las invasiones biológicas, junto con otros factores ambientales que afectan al planeta, como la pérdida y fragmentación del hábitat, la contaminación o el cambio climático, contribuyen a la pérdida de biodiversidad y a cambios en el funcionamiento de los ecosistemas que afectan nuestras vidas.

Las invasiones biológicas no son un fenómeno moderno. Existen casos de invasiones biológicas muy relevantes que datan de tiempos históricos. El mayor intercambio de especies se produjo con el colonialismo europeo, cuando los grandes imperios fueron responsables de la redistribución de muchas especies alrededor del mundo (Lenzner et al, 2022). Actualmente, la flora exótica de las regiones que pertenecieron a estos imperios posee una similitud que se explica más por las relaciones comerciales



**Figura 1.** Algunos animales exóticos invasores pueden causar problemas de salud pública por ser reservorios o vectores de parásitos que ocasionan enfermedades en humanos.

**A) Coipú (*Myocastor coypus*).** Wikimedia commons, Basile Morin

**B) Mapache (*Procyon lotor*).** Wikimedia commons, Cary Bass-Deschênes

**C) Mosquito tigre (*Aedes albopictus*).** Wikimedia commons, James Gathany.

| Especie                                             | Áreas de origen                         | Modo de introducción                | Impactos                                                                                                |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alga asiática<br>( <i>Rugulopterix okumurae</i> )   | Océano Pacífico de Asia                 | Agua de lastre                      | Biodiversidad<br>Pesquerías<br>Turismo y actividades recreativas                                        |
| Mosquito tigre<br>( <i>Aedes albopictus</i> )       | Sur de Asia                             | Recipientes con agua                | Salud pública<br>(picaduras y transmisor de patógenos)<br>Turismo y actividades recreativas             |
| Cotorra de Kramer<br>( <i>Psittacula krameri</i> )  | Sur de Asia y África                    | Mascota                             | Salud pública<br>(ruidos, salubridad)<br>Biodiversidad<br>Infraestructuras                              |
| Jacinto de agua<br>( <i>Eichhornia crassipes</i> )  | Sudamérica                              | Ornamental                          | Biodiversidad<br>Calidad del agua<br>Navegación<br>Actividades recreativas<br>Pesca                     |
| Mejillón cebra<br>( <i>Dreissena polymorpha</i> )   | Mar Caspio y Mar Negro                  | Cascos de los barcos/agua de lastre | Biodiversidad<br>Calidad del agua<br>Infraestructuras<br>Pesca<br>Turismo y actividades recreativas     |
| Coipú<br>( <i>Myocastor coypus</i> )                | Sudamérica                              | Mascota, industria peletera         | Biodiversidad<br>Calidad del agua<br>Agricultura                                                        |
| Xylella fastidiosa                                  | California                              | En material vegetal infectado       | Biodiversidad<br>Agricultura                                                                            |
| Siluro<br>( <i>Silurus glanis</i> )                 | Centroeuropa                            | Pesca recreativa                    | Biodiversidad<br>Calidad del agua<br>Turismo y actividades recreativas                                  |
| Rabo de gato<br>( <i>Cenchrus setaceus</i> )        | África, Oriente Medio y Sudeste de Asia | Ornamental                          | Biodiversidad<br>Riesgo de incendios<br>Salud pública<br>(alergias, dermatitis)<br>Actividad recreativa |
| Uña de gato<br>( <i>Carpobrotus edulis</i> )        | Sudáfrica                               | Ornamental<br>Restauración          | Biodiversidad<br>Calidad del suelo                                                                      |
| Picudo rojo<br>( <i>Rhynchophorus ferrugineus</i> ) | Asia tropical                           | En material vegetal infectado       | Biodiversidad<br>Estético                                                                               |
| Avispa asiática<br>( <i>Vespa velutina</i> )        | Asia                                    | Carga de barco                      | Biodiversidad<br>Salud pública (picaduras)<br>Apicultura                                                |
| Jacinto de agua<br>( <i>Eichhornia crassipes</i> )  | Sudamérica                              | Ornamental                          | Biodiversidad<br>Calidad del agua<br>Navegación<br>Actividades recreativas                              |
| Cangrejo azul<br>( <i>Callinectes sapidus</i> )     | Norteamérica                            | Escapado de piscifactoría           | Biodiversidad<br>Calidad del agua<br>Pesquerías<br>Agricultura                                          |

**Tabla I. Multiplicidad de taxones, orígenes, modos de introducción e impactos de algunas especies exóticas invasoras introducidas en España en las últimas décadas.**



y administrativas de antaño que por la proximidad geográfica o afinidad climática. No solo la flora, el colonialismo fomentó la introducción masiva de animales domésticos necesarios para reproducir las actividades productivas y el estilo de vida europeos. Inconscientemente, los colonizadores europeos también introdujeron patógenos que causaron epidemias sin precedentes en las poblaciones indígenas, como la gripe, el sarampión o la varicela. El historiador A. Crosby (1988) acuñó el término **imperialismo ecológico** para describir cómo el resultado final del imperialismo no fue únicamente militar o político, sino también de orden biológico. Por ejemplo, los colonos europeos en América transformaron el paisaje en el que se asentaron, creando áreas de pastoreo para el ganado y desarrollando una agricultura extensiva cuyo manejo favoreció la expansión de muchas especies exóticas. Como resultado, estas regiones alejadas del continente europeo poseen actualmente una biota mixta nativa y exótica, con una abrumadora dominancia de flora, fauna y microorganismos de origen europeo (Galán-Díaz et al, 2020).

Si bien durante los siglos XV-XIX el flujo de especies fue mayoritariamente entre los territorios que configuraban cada uno de los imperios europeos, en la actualidad la creciente introducción de especies se mueve asociada a las grandes infraestructuras de comunicación y a las rutas comerciales, que son mucho más extensas, intensas y complejas que en el pasado. Por ejemplo, el Canal de Suez constituye una vía de entrada de muchas especies marinas para expandirse del Mar Rojo a la costa Levantina del Mediterráneo oriental, un fenómeno que, junto con el calentamiento global, está contribuyendo a la tropicalización del Mar Mediterráneo. En otro caso más reciente e inesperado, el cambio climático y la consecuente pérdida de la cubierta de hielo está potenciando la apertura de nuevas rutas marítimas en el Ártico, lo que sin duda facilitará el movimiento de especies entre continentes y el incremento de nuevas introducciones (Chan et al, 2018).

No todas las especies exóticas son invasoras, de hecho, muchas de ellas ni siquiera logran establecerse en el medio natural cuando se introducen. Es más, muchas probablemente mueren durante el transporte. No obstante, algunas no solo se establecen, sino que se expanden rápidamente y causan importantes daños materiales e inmateriales en la biodiversidad, en la economía y en la sociedad. En este artículo intentaremos responder a algunas preguntas clave

sobre las invasiones biológicas: ¿cuáles son las causas del éxito de las especies exóticas fuera de su área de distribución original?, ¿por qué nos preocupan? y ¿qué herramientas tenemos para mitigar sus impactos?

### ¿CUÁLES SON LOS MODOS DE INTRODUCCIÓN DE LAS ESPECIES EXÓTICAS?

Las especies exóticas son introducidas de forma intencionada o accidental (Hulme et al, 2008). Las introducciones intencionadas están muy relacionadas con el uso directo de especies, mientras que las introducciones accidentales pasan inadvertidas como polizones o contaminantes biológicos de otros materiales, como contenedores comerciales (Tabla I).

En las aguas continentales de España, durante los años 1950-1990, se introdujeron al menos 25 especies de peces con fines recreativos (ej. el lucio – *Esox lucius*, la perca negra – *Micropterus salmoides*, el siluro – *Silurus glanis*, etc). La voracidad de estas especies sobre la fauna acuática autóctona es tal que, en la actualidad, la mayoría de los ríos, lagos y embalses españoles albergan más especies piscícolas exóticas que nativas. Con la misma intencionalidad deportiva, en los ecosistemas terrestres se han introducido especies cinegéticas, como por ejemplo la codorniz japonesa – *Coturnix japonica*. No menos preocupante es la introducción en el medio natural de mascotas exóticas liberadas expresamente o resultado de escapes. Las cotorras – *Psittacula krameri* y *Myiopsitta monachus* – o los mapaches – *Procyon lotor* – son un claro ejemplo de ambos casos. Seguramente muchas poblaciones se han originado a través de individuos escapados de criaderos comerciales, como ha ocurrido con el visón americano – *Neogale vison* – desde granjas peleteras.

En relación a las plantas exóticas, el principal objetivo de las introducciones intencionadas es ornamental, ya sea cultivadas en parques y jardines, o plantadas en proyectos de restauración de obras públicas. En los principales parques urbanos de España, más de un 82% de las especies plantadas son exóticas (Bayón et al, 2021). Un 12% de ellas son invasoras, e incluso algunas están catalogadas por la ley española sobre prevención y control de especies invasoras, lo que implica que su uso es ilegal y deberían eliminarse (BOE 2019). La invasión de espa-

cios naturales desde jardines se puede dar de forma espontánea por dispersión de las semillas, pero en la mayor parte de los casos se produce a través de los restos de poda que se vierten indiscriminadamente alrededor de las zonas ajardinadas. Desgraciadamente, esto ocurre muy a menudo desde las áreas residenciales de la costa o periurbanas hacia los espacios naturales adyacentes (González-Moreno et al, 2013a).

Además de las mascotas escapadas mencionadas anteriormente, muchas especies son introducidas de forma accidental como polizones o contaminantes de distintos materiales transportados. En las Islas Baleares, varias especies de serpientes exóticas se han introducido ocultas dentro de troncos de olivo importados con fines ornamentales desde la Península Ibérica. El mosquito tigre, que se detectó por primera vez en 2004 en Sant Cugat del Vallés (Barcelona), posiblemente se introdujo a través del transporte de neumáticos y vasijas de plantas ornamentales importadas. Su expansión pasiva en los últimos 20 años por toda la costa mediterránea ha sido sencillamente a través de los medios de transporte. Así, es muy probable que las primeras incursiones desde el área metropolitana de Barcelona a la Costa Brava las realizaran a bordo de los coches de los veraneantes que se desplazaban a sus segundas residencias.

Es importante remarcar que, en la mayoría de los casos de plantas e invertebrados, la introducción accidental no ocurre con organismos adultos, sino con sus unidades de propagación, tales como semillas, esquejes, huevos, esporas, larvas o crisálidas. Muchas “malas hierbas” de cultivo se introducen repetidamente a través de las semillas comerciales, en el sustrato que se esparce en la siembra o de la maquinaria agrícola. En Baleares, se han encontrado hasta 2.000 semillas por kg “polizonas” en paquetes certificados para siembra de césped, de las cuales un 11% eran exóticas para las islas (Gervilla et al, 2019). Es muy probable que estas introducciones accidentales se incrementen con el uso cada vez más extensivo de semillas no certificadas, muchas de las cuales pueden adquirirse a través del comercio electrónico.

La mayoría de patógenos agrícolas y forestales han sido introducidos también de forma accidental. Muchos insectos causantes de plagas han entrado ocultos en forma de huevos o crisálidas en las ranuras de troncos o en contenedores de madera.

Existen casos paradigmáticos e históricos como el de la filoxera – *Daktulosphaira vitifoliae* – un insecto hemíptero con origen americano que a finales del siglo XIX causó estragos en las zonas vitivinícolas españolas y francesas. Esta invasión, posiblemente originada por la introducción de una sola planta infectada en Málaga, cambió por completo las reglas del juego, obligando a replantar con vides resistentes la gran mayoría de plantaciones. Más recientemente, hemos sufrido la invasión de una nueva plaga invasora, en este caso una bacteria de origen californiano, *Xylella fastidiosa*, que ataca los vasos conductores de especies arbóreas hortícolas de alto valor económico tales como el olivo, el almendro, la vid, el naranjo, el limonero o el melocotonero, además de unas 600 especies silvestres. Localmente, la bacteria se transmite por varias especies de chicharritas (ej. *Philaenus spumarius*), que se alimentan de la savia de las plantas. En Europa, *Xylella fastidiosa* se detectó por primera vez en Apulia (Italia) en 2012 causando una elevada alarma social y dando lugar a una campaña de erradicación que llevó a la eliminación de árboles infectados en un área de más de 1.000 km<sup>2</sup> (Saponari et al, 2018). Cuatro años más tarde apareció en las Baleares y en 2017 invadió un área de Alicante atacando principalmente a almendros. En esta última zona se está realizando un gran esfuerzo para contener la invasión y evitar su propagación al resto de la península, ya que *Xylella fastidiosa* se considera uno de los patógenos más amenazantes para la agricultura en la Unión Europea.

La entrada accidental de especies exóticas se ha beneficiado de la construcción de grandes corredores artificiales (carreteras, vías férreas, puentes, presas, canales, tuberías, etc.) que han puesto en contacto biotas de regiones que previamente se encontraban geográficamente aisladas. En Europa, el Canal de Moscú, el Canal Volga-Don y la Vía fluvial Volga-Báltico forman vías navegables que han conectado el Mar Báltico, el Mar Caspio, el Mar de Azov y el Mar Negro. Así, el mejillón cebra – *Dreissena polymorpha* – originario del Mar Caspio y del Mar Negro, ha invadido el norte de Europa adherido a los cascos y contenido en las aguas de lastre de los barcos que navegan por estas rutas. En España, la llegada y rápida expansión de este molusco en menos de 20 años se ha visto facilitada por el trasiego de embarcaciones, las actividades de acuicultura y pesca cuyos equipos pueden ser vectores de introducción, y las captaciones y canalizaciones de agua para riego y abastecimiento.



El abanico de posibles modos de entrada de especies exóticas pone de manifiesto la multiplicidad de actividades socioeconómicas que conducen al traslado, voluntario o involuntario, de especies entre regiones alejadas. Numerosos análisis han demostrado que los países o regiones con más especies exóticas son los que poseen mayor densidad de población y mayor renta per cápita, ya que son los más activos comercialmente, poseen infraestructuras extensas y complejas, y tienden a introducir deliberadamente más especies con finalidad ornamental o recreativa. En este sentido, vemos un cambio de patrón en las últimas décadas: es muy probable que los países en desarrollo con mayor crecimiento económico (ej. sudeste asiático) sean los que acumulen un mayor número de invasiones en los próximos años (Seebens et al, 2021).

#### ¿QUÉ CARACTERÍSTICAS POSEEN LAS ESPECIES INVASORAS?

Las especies exóticas que consiguen establecerse y proliferar en hábitats donde no han evolucionado poseen ciertos rasgos en común. Muchas plantas empiezan invadiendo zonas perturbadas porque poseen tasas de crecimiento rápidas y comparten características fisiológicas que las hacen muy eficientes en el uso de los recursos esenciales para su desarrollo, como el agua, los nutrientes y la luz. Por ejemplo, las plantas con una superficie específica foliar grande interceptan mejor la luz y por tanto pueden tener tasas fotosintéticas más altas y crecer más rápidamente. Las plantas con raíces extensas captan agua de áreas de suelo más amplias, mientras que las plantas que establecen simbiosis con bacterias fijadoras de nitrógeno poseen mayor disponibilidad de este elemento para su crecimiento. Muchas plantas invasoras también tienen una elevada plasticidad fenotípica, es decir, una gran capacidad de aclimatarse a distintas condiciones ambientales (Matesanz et al, 2010). En los animales, esta característica se manifiesta en dietas y requerimientos de hábitat generalistas. Los cangrejos invasores son los invertebrados que mejor representan esta tendencia: son omnívoros, toleran un amplio rango de salinidad y temperatura, pueden permanecer enterrados en el suelo durante mucho tiempo en condiciones de sequía y se reproducen prolíficamente. Estos mismos rasgos explicarían que con el cambio climático las especies invasoras se estén expandiendo a velocidades hasta 20 veces superiores a las especies nativas (Bradley et al, 2024).

Gran parte del éxito de las especies invasoras radica en la cantidad y frecuencia con que se han introducido. La historia de introducción juega un papel muy importante para comprender la presencia de nuevas especies en un territorio. A lo largo del siglo XIX, en Nueva Zelanda y Estados Unidos, las sociedades de aclimatación introdujeron y liberaron un gran número de aves con la finalidad de embellecer el paisaje. Por ejemplo, a partir de unos centenares de estorninos europeos – *Sturnus vulgaris* – liberados en Nueva York y en otras ciudades de Estados Unidos, en la actualidad se cuentan más de 100 millones en toda América del Norte, causando pérdidas agrícolas por valor de casi mil millones de dólares (Stuart et al, 2023). Gracias a estos “experimentos”, hoy sabemos que la tasa de establecimiento fue del 30% para especies de las que se introdujeron entre 21-100 individuos, mientras que la tasa de éxito alcanzó el 74% cuando el número de individuos introducidos superó el centenar (Duncan et al, 2006). Por lo general, las especies más abundantes o que ocupan una mayor área de distribución son las que se han introducido con mayor frecuencia, mayor abundancia, en más lugares y durante más tiempo. Siguiendo la misma lógica, las áreas más invadidas suelen ser aquellas expuestas a la introducción prolongada y frecuente de más propágulos.

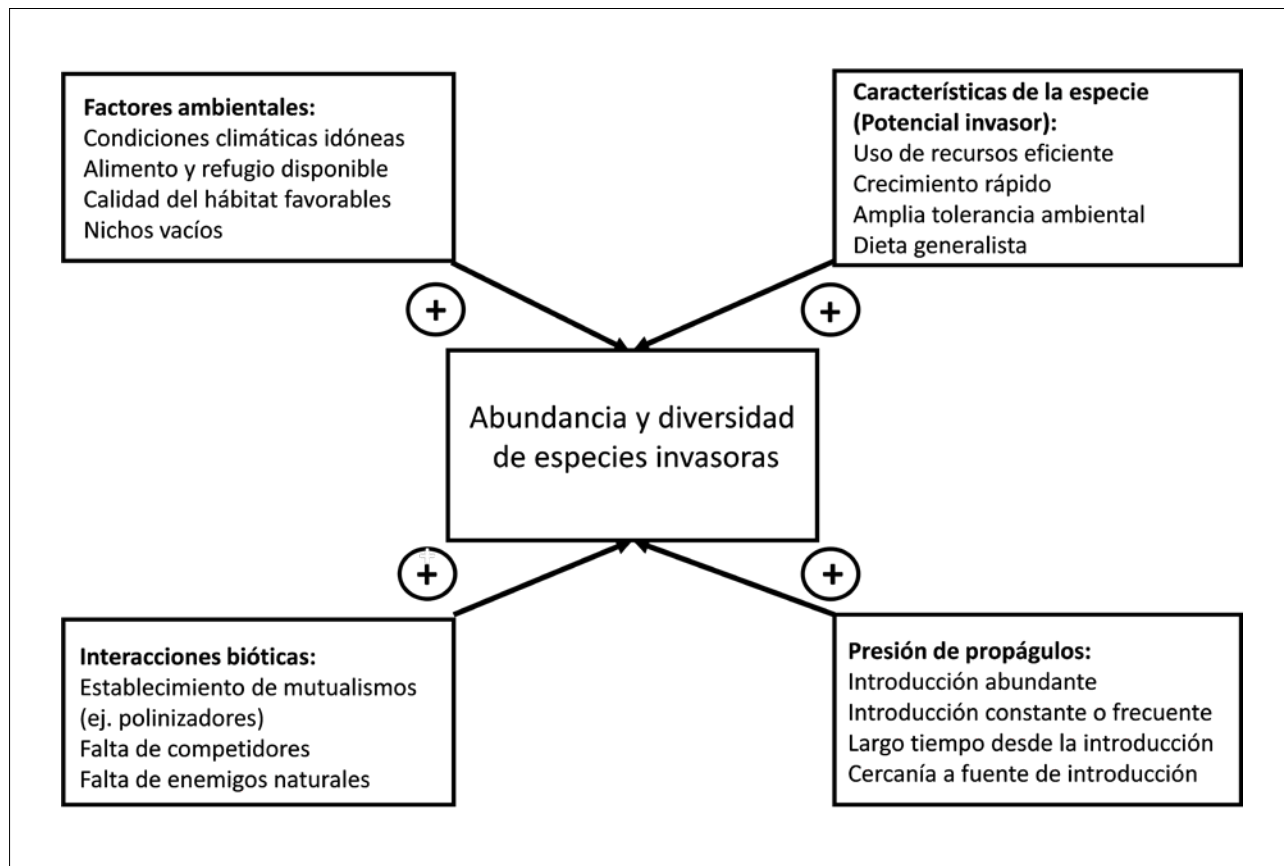
La relación entre el área de invasión y la presión de propágulos se aprecia a muchas escalas. Por lo general, las especies introducidas hace más tiempo –lo que se conoce como tiempo mínimo de residencia– son las que poseen un área de distribución nacional más amplia. En España, según modelos climáticos de nicho, la mayor parte de especies vegetales invasoras no han alcanzado aún su máxima distribución potencial, la cual, en promedio, se lograría aproximadamente 150 años después de su introducción (Gassó et al, 2010). A escala de paisaje, también observamos que las zonas más invadidas son las que se encuentran más cerca de posibles fuentes de introducción, como áreas adyacentes a cultivos, junto a puertos, a lo largo de vías férreas, o en áreas vecinas a zonas ajardinadas (González-Moreno et al. 2013b; Gallardo et al, 2015).

#### ¿QUÉ CARACTERÍSTICAS POSEEN LOS ECOSISTEMAS INVADIDOS?

Además de unos rasgos biológicos competitivos y una presión de propágulos significativa, para que una especie exótica se establezca y llegue a convertirse

en invasora debe encontrar unas condiciones ambientales similares a aquellas en las que ha evolucionado en su área de distribución de origen (Figura 2).

*priori* si podrían sobrevivir en otras condiciones. Se dice pues que la distribución de la especie en el área de introducción no está en equilibrio, lo que sugiere



**Figura 2.** Factores que determinan el éxito de invasión de una especie exótica cuando se introduce en un nuevo ecosistema.

Es decir, que su nicho ambiental o ecológico se conserve entre la zona nativa e introducida. Esta hipótesis se ha demostrado a escala regional en muchas ocasiones, utilizando lo que se denominan modelos de distribución de especies o de nicho ecológico. La mayor parte de los estudios indican dos aspectos clave. Por un lado, la especie invasora coloniza áreas que son muy similares climáticamente al rango nativo, lo que conoce como conservación de nicho. Por otro lado, sabemos que algunas especies invasoras ocupan áreas con características totalmente distintas, que en algunos casos ni siquiera se dan en sus regiones de origen, es decir presentan una expansión de nicho. Esto ocurre porque las especies en su rango nativo pueden estar confinadas geográficamente, por ejemplo, en una isla, lo que impide conocer a

que posee mayor capacidad de invasión que la observada, y en ocasiones, una mayor tolerancia climática a la esperada. Esta característica dificulta predecir el potencial invasor de las especies basándonos únicamente en su comportamiento en la zona nativa.

Además de las condiciones climáticas, existen otros factores que favorecen la invasión de los hábitats. Muchos estudios han demostrado que los ecosistemas más vulnerables a las invasiones son los ecosistemas perturbados. En este caso, la alteración del hábitat puede generar “ventanas” de oportunidad asociadas a un aumento en la disponibilidad de recursos (p.ej. nutrientes y espacio) que aprovecharían las especies exóticas para establecerse. Además, los hábitats alterados suelen estar más cerca de posi-



bles fuentes de propágulos de especies exóticas. Un ejemplo de ello son las zonas forestales cercanas a urbanizaciones, donde la probabilidad de escapes accidentales desde jardines al medio forestal es considerablemente alta (González-Moreno et al, 2013a).

Por el contrario, los ecosistemas con una gran diversidad de especies tienden a ser más resistentes a las invasiones (Beaury et al, 2020), posiblemente porque ejercen una mayor competencia sobre la especie foránea. Siguiendo este razonamiento, pero en sentido inverso, los hábitats con pocas especies, muchas de ellas endémicas, como podrían ser las islas, son más susceptibles a la invasión y sus impactos. En estos casos, el aislamiento geográfico de las islas ha propiciado la evolución de especies que pueden no estar adaptadas a defenderse de depredadores agresivos o competidores altamente eficientes. En el archipiélago balear, la introducción hace varios siglos de la culebra de cogulla – *Macroprotodon brevis* –, se considera responsable de la extinción de varios lagartos y anfibios autóctonos en Mallorca y Menorca (Silva-Rocha et al, 2015). Este proceso de invasión se ha intensificado en los últimos años, de forma que islas como Ibiza y Formentera, que hasta hace poco estaban libres de serpientes, desde 2003 han registrado la llegada de tres nuevas serpientes exóticas, generando una fuerte presión sobre la frágil fauna de estas islas.

En un siguiente nivel, los ecosistemas receptores pueden favorecer o no la invasión dependiendo de las interacciones que se establezcan entre la especie exótica y las especies nativas (Figura 2). En el caso de las plantas invasoras, es sabido que hay dos tipos de interacciones bióticas de signo contrario que influyen en su establecimiento. Estas son, por un lado, las relaciones mutualistas con la biota nativa y por el otro, la falta de enemigos naturales que las mantenían controladas en las regiones de origen (Vilà et al, 2004). En muchos casos, para que una planta exótica se integre en un ecosistema, es necesario que establezca interacciones mutualistas con las especies nativas. Estas interacciones son imprescindibles para que algunas especies vegetales puedan reproducirse y dispersarse. Muchas plantas exóticas ornamentales producen flores muy atractivas para los insectos polinizadores locales, esenciales para que produzcan semillas. Puede ocurrir además que este efecto magnético vaya en detrimento de que los insectos visiten a las plantas nativas y pongan en peligro su reproducción. Este fenómeno ocurre con los cactus del género *Opuntia* spp., una de las primeras plantas

introducidas en el siglo XVI desde México por los conquistadores españoles (Vilà, 2011). Sus flores son visitadas por más de 15 especies distintas de insectos, mayoritariamente himenópteros, mientras que las visitas disminuyen significativamente en las plantas nativas de su alrededor (Bartomeus et al, 2008).

Otra interacción mutualista fundamental en las plantas exóticas con dispersión por zoocoria es que encuentren una fauna local que consuma sus semillas o frutos, y al regurgitarlos o defecarlos, no solamente aumente su tasa de germinación, sino que también contribuya a su expansión. Volviendo al ejemplo anterior, los higos chumbos producidos por *Opuntia* spp. son consumidos por una gran variedad de vertebrados como estorninos, zorzales, gaviotas, jabalíes y distintas especies de mustélidos, que facilitan su expansión en hábitats naturales lejos de donde fueron introducidos (Padrón et al, 2010).

En la otra cara de la moneda, el éxito de muchas especies exóticas se debe a que, en su área de distribución original, las especies están “controladas” por enemigos naturales como parásitos, patógenos y herbívoros especialistas. Pero cuando estas especies se introducen en una región lejana, pierden estas interacciones antagonistas, lo que les permite crecer sin las limitaciones impuestas por sus depredadores o competidores naturales. Son bastantes los estudios que han demostrado que las plantas en las poblaciones de la región de introducción suelen ser más grandes, poseen menos síntomas de infección o daño por herbívoros en comparación con las poblaciones de la región nativa (Maron et al, 2004). La explicación radica en que la falta de enemigos naturales disminuye la necesidad de invertir recursos en la síntesis de compuestos de resistencia que la planta puede invertir en crecimiento y fecundidad.

#### ¿QUÉ IMPACTOS OCASIONAN LAS INVASIONES BIOLÓGICAS?

Las invasiones biológicas ocasionan impactos en la naturaleza, en los servicios ambientales y en nuestra calidad de vida (Tabla I). Impactos que en muchos casos se pueden traducir en costes económicos significativos.

Muchas especies nativas no pueden sobrevivir a la competencia, la herbivoría, la depredación o el para-

sitismo ejercido por las especies invasoras. El impacto en la naturaleza más estudiado es la pérdida de diversidad de especies nativas. Esta pérdida es fácil observarla en un ecosistema invadido por una planta exótica que crezca tapizando el suelo (ej. la uña de león – *Carpobrotus* spp.) o que produzca mucha sombra y hojarasca (ej. *Acacia* spp.). En estos casos, se percibe claramente que la riqueza de las plantas nativas disminuye de forma proporcional a la abundancia de la planta invasora (Bradley et al, 2019). La mayor parte de los estudios documentan pérdidas locales de especies, pero también han contribuido a la extinción global de especies (Bacher et al, 2023). Muchas de estas extinciones han ocurrido en islas oceánicas, puesto que albergan endemismos muy vulnerables a los factores de cambio, en especial a la introducción de depredadores como ratas o gatos.

Algunas veces se pueden dar fenómenos de pérdida de especies en cascada que ocasionan cambios drásticos en toda la red trófica del ecosistema. En los ecosistemas acuáticos, la introducción de cangrejos, omnívoros por antonomasia, modifican totalmente la composición de especies de los ecosistemas invadidos (Clavero et al, 2016). Un caso paradigmático es el del cangrejo rojo americano – *Procambarus clarkii* –, introducido para su explotación comercial. Su comportamiento y carácter transformador del ecosistema ha originado cambios fundamentales en el hábitat, alterando las condiciones hídricas y por tanto la composición de especies de los ecosistemas donde se ha establecido (Souty-Grosset et al, 2016).

Por supuesto, estos cambios en la composición de especies indican que la especie exótica se ha integrado en el ecosistema receptor, con efectos positivos y negativos para las especies nativas (Bacher et al, 2023). Por ejemplo, puede darse el caso de que una especie exótica depreda sobre una especie nativa, poniendo en peligro su supervivencia, pero al mismo tiempo amplíe la dieta de otra especie nativa. Esta paradoja ocurre también con el cangrejo americano. Un 60% de los depredadores que invernán o se reproducen en las marismas del Guadalquivir se alimentan del cangrejo, incluida la nutria – *Lutra lutra* –; pero las charcas invadidas por el cangrejo poseen una menor riqueza de anfibios, muchos de los cuales dejan de reproducirse (Cruz et al, 2006; Tablada et al, 2010). No obstante, el mensaje clave es que las invasiones biológicas ocasionan cambios significativos en la estructura de los ecosistemas invadidos.

A largo plazo, estos cambios bióticos en la composición y diversidad de especies van acompañados de alteraciones abióticas que afectan el funcionamiento de los ecosistemas (Vilà et al, 2011). Es decir, modifican parámetros ambientales clave, tales como la disponibilidad y reciclaje de nutrientes o la calidad y cantidad del agua. Por ejemplo, las acacias originarias de Australia o África son fijadoras de nitrógeno. Su presencia aumenta la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, lo que puede favorecer a las propias acacias y a especies que requieren suelos ricos en nutrientes, pero perjudicar a árboles nativos adaptados a suelos pobres. En el NE de la Península Ibérica, los eucaliptos de las plantaciones se han expandido a bosques adyacentes. Su potencial de regeneración después de incendios es muy elevado (Calviño-Cancela et al, 2016). Además, su hojarasca posee propiedades hidrofóbicas que aumentan la escorrentía (Ferreira et al, 2000), dificultando el establecimiento de otras especies nativas presentes en la zona antes de la expansión del eucalipto.

Estos impactos en la naturaleza se traducen en modificaciones en los servicios ambientales (Vilà et al, 2009; Castro-Díez et al, 2019). Los servicios ambientales son los beneficios que aportan los ecosistemas a los seres humanos y se clasifican en 18 clases. Los beneficios más tangibles de la naturaleza hacen referencia a la provisión de todos aquellos bienes materiales que extraemos de ella: como alimentos, agua, sustancias medicinales y recursos genéticos, fibras o productos energéticos. Otros servicios ambientales básicos son los de regulación: aquellos que contribuyen a mantener los ecosistemas limpios, funcionales y resilientes ante perturbaciones. Entre ellos se encuentran el reciclaje de la materia orgánica, la purificación del agua, el control de la erosión, la regulación del clima y otros quizás menos conocidos pero fundamentales como los servicios de polinización o control de plagas, tanto en plantas silvestres como en cultivos.

Las especies invasoras pueden ocasionar impactos en todos los servicios ambientales, y por tanto en diversos sectores socioeconómicos tales como la agricultura debido a la proliferación de malas hierbas y plagas; la acuicultura por la introducción de patógenos; la construcción, a través de la alteración de infraestructuras por especies que las obstruyen o deterioran; el sector turístico e incluso la salud pública, cuando las especies introducidas son tóxicas, transmiten patógenos o producen alergias (Vilà et al, 2010; Gallardo et al. 2024).



Las zoonosis constituyen un grupo de enfermedades humanas transmitidas por animales. Las zoonosis mediadas por especies exóticas que actúan como vectores o reservorios de patógenos y parásitos merecen especial atención por sus riesgos para la salud pública (Vilà et al, 2021). El mosquito tigre, es transmisor de enfermedades víricas como el chikungunya y el dengue. Aunque estas enfermedades no son comunes en España, en otros países europeos donde este mosquito se ha establecido se han registrado centenares de casos de transmisión local a partir de viajeros procedentes de áreas donde estas enfermedades son endémicas. Algunas mascotas exóticas pueden ser reservorios de patógenos causantes de enfermedades como la rabia, salmonelosis, meningoencefalitis o psitacosis. Esto no es un problema si las mascotas reciben un adecuado cuidado por parte de sus propietarios, pero el riesgo de transmisión de parásitos y patógenos aumenta cuando se abandonan y entran en contacto con la fauna silvestre o el ganado. Algunos mamíferos invasores en Europa, como el mapache – *Procyon lotor* –, el coipú o la ardilla gris – *Sciurus griseus* – son capaces de transmitir como media 16 patógenos diferentes (Monguillod 2023) con capacidad de causar enfermedades graves como la echinococcosis, leptospirosis, síndrome de Lyme, neuroborreliosis y encefalitis (Figura 1).

Algunas plantas exóticas producen polen alergénico. Dado que muchas de estas especies exóticas florecen en un periodo distinto al de las plantas nativas, el riesgo de alergia por niveles de polen alto en la atmósfera se prolonga a lo largo del año (Belmonte & Vilà, 2004). Cabe destacar que muchos árboles ornamentales exóticos, como el ciprés – *Cupressus sempervirens* –, la casuarina – *Casuarina equisetifolia* – o el plátano – *Platanus* spp. – aun cuando no sean invasores, producen polen alergénico y por tanto su plantación en zonas urbanas debería evitarse por razones de salud pública.

Además de los impactos en la salud pública, las invasiones pueden afectar varios componentes de la calidad de vida, como la seguridad ciudadana y las relaciones sociales o culturales. En menos de 10 años, el alga asiática *Rugulopterix okumurae* se ha expandido rápidamente por las costas del Estrecho de Gibraltar causando impactos socioeconómicos y medioambientales sin precedentes. Posee una capacidad de proliferación elevada y se acumula en la columna de agua hasta los 50 m de profundidad, llegando a los fondos marinos de fanerógamas y coral, y cambiando por completo la biodiversidad marina. Es tan abundante

que interfiere con las artes de pesca y en la costa, se acumula formando mantos en descomposición que restringen el acceso a los bañistas. Los costes asociados a la presencia de esta especie en el municipio de Tarifa superan los 3 millones de euros anuales, afectando tanto al sector pesquero como al turismo y la administración pública (Mogollón et al, 2024).

Según el informe de la Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES), en el año 2019 los daños globales causados por las invasiones biológicas superaron los 423.000 millones de dólares, un valor más de 60 veces superior al presupuesto de la Organización Mundial para la Salud de las Naciones Unidas para el bienio 2024-2025. Los costes más elevados corresponden al sector agrícola, debido a las plagas a las que debe hacer frente. En su conjunto, los daños asociados a las invasiones biológicas son al menos un orden de magnitud superior a las inversiones destinadas a su prevención, control o erradicación (Diagne et al, 2021). En España, el coste estimado del manejo de las invasiones biológicas oscila entre 4 y 13 millones de euros por año; sin embargo, la cifra real probablemente sea mucho mayor (Angulo et al, 2021). Sólo por poner un ejemplo, el control del jacinto de agua – *Eichhornia crassipes* – en la cuenca del río Guadiana se estima en unos 53 millones de euros. Otras especies con un elevado coste de control incluyen los eucaliptos – *Eucalyptus* spp. – en Galicia, el picudo rojo que ataca a las palmeras, la caña común – *Arundo donax* –, que invade bosques de ribera y el rabo de gato que se expande en zonas semi áridas del sur de España y Canarias (Angulo et al, 2021).

#### ¿CÓMO SE GESTIONAN LAS INVASIONES BIOLÓGICAS?

Los procedimientos para reducir las invasiones biológicas son similares a los que se llevan a cabo en salud pública para evitar una epidemia: prevención, detección temprana, control y erradicación (Vilà et al, 2021). Estas medidas de gestión pretenden evitar o reducir la probabilidad de ocurrencia en las distintas etapas del proceso de invasión, desde el transporte e introducción hasta la expansión, pasando por el establecimiento (Figura 3). Estas actividades deberían llevarse a cabo simultáneamente, dependiendo de la especie y del área de interés.

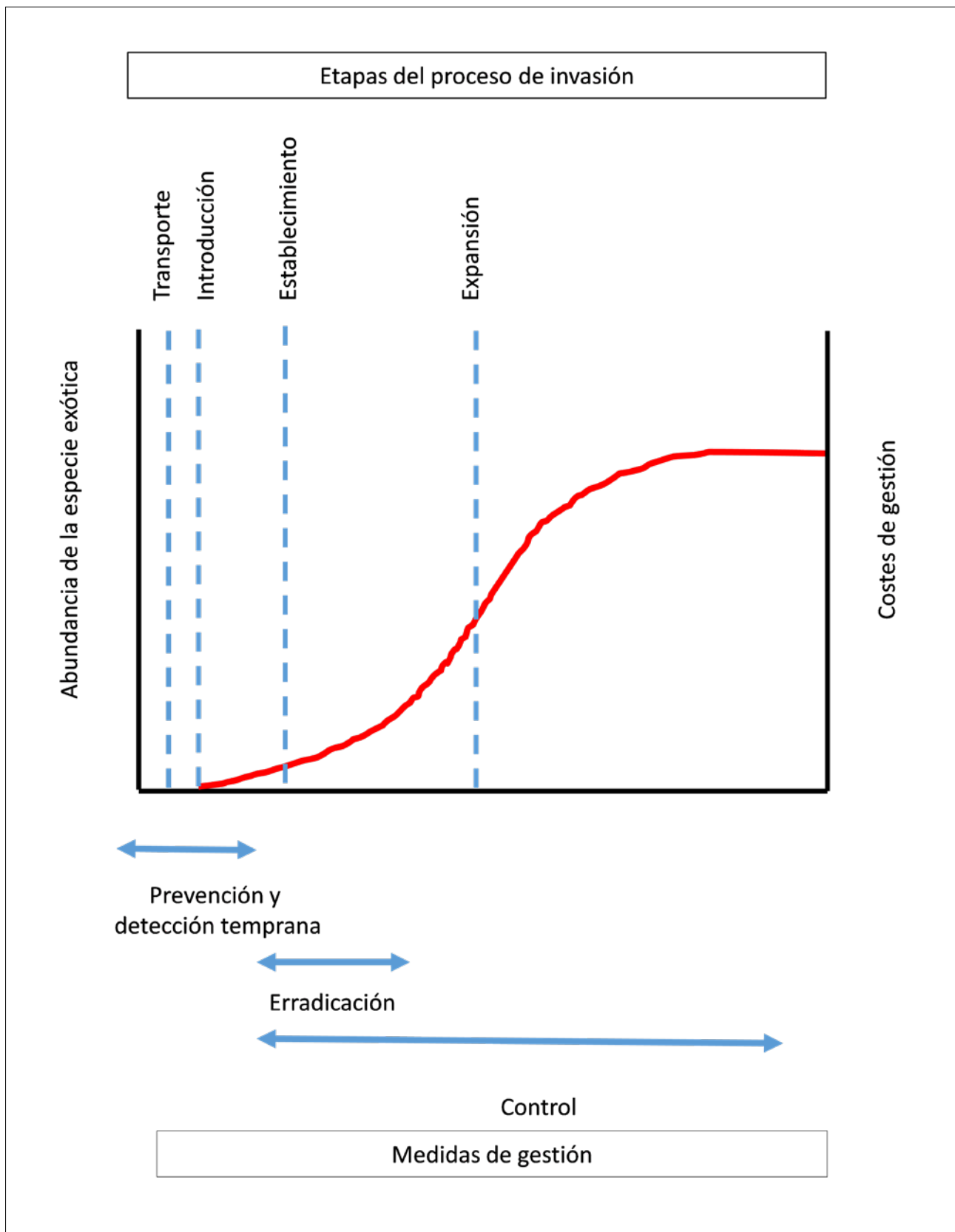


Figura 3. Etapas del proceso de invasión y medidas de gestión recomendadas.



La prevención es, sin duda, la medida de gestión más efectiva para evitar la entrada de especies exóticas transportadas o bien para detectar los primeros focos de establecimiento (Pyšek et al, 2020). Los países con sólidos sistemas de bioseguridad, tales como Australia o Nueva Zelanda, han conseguido que los costes de prevención sean menores que los costes ocasionados por los daños de las invasiones. En teoría, es posible prevenir la entrada de especies exóticas a través de medidas de regulación de la introducción intencionada, pero es mucho más difícil controlar aquellas que entran y se establecen de forma accidental. Para estas especies, que pueden expandirse secundariamente por sus propios medios, es muy importante que se lleven a cabo protocolos de detección temprana. Para ello, en muchas regiones, especialmente en islas debido a su vulnerabilidad, se han establecido protocolos de inspección y control cerca de los principales puntos de entrada de mercancías y personas. Estos protocolos suelen basarse en el uso de trampas genéricas y en muestreos dirigidos para grandes grupos taxonómicos (ej. trampas de invertebrados). También existen protocolos establecidos para especies con alto potencial de impacto. Este es el caso del listado de la Unión Europea de especies de cuarentena con alto potencial de impacto en la seguridad alimentaria, para los cuales todos los países miembros deben establecer protocolos estandarizados e informar de los resultados. Finalmente, la ciencia ciudadana y las plataformas generalistas de toma de datos de biodiversidad, como por ejemplo iNaturalist o eBird, pueden contribuir a la identificación temprana de nuevas introducciones, si bien estas herramientas suelen estar sesgadas hacia grupos taxonómicos carismáticos entre los aficionados (González-Moreno et al, 2025).

Una vez que una especie exótica ya está establecida, es muy difícil erradicarla a menos que la población sea pequeña y esté muy localizada. En el mejor de los casos, se podrá controlar su expansión, es decir, disminuir el tamaño y número de las poblaciones. En España, los métodos de control son mecánicos o químicos. En la Unión Europea, el control biológico—basado en la introducción de un enemigo natural específico—se aplica principalmente en sistemas agrícolas confinados como invernaderos, pero es muy poco común en áreas naturales debido a las estrictas regulaciones necesarias para garantizar su seguridad y evitar daños colaterales. En otras regiones, como Australia y Nueva Zelanda, el control biológico en medio natural ha demostrado ser altamente eficaz. En nuestro contexto ibérico tenemos un caso de éxi-

to con el control de acacias en Portugal mediante la liberación de *Trichilogaster acaciaelongifoliae*, una avispa formadora de agallas originaria de Australia, al igual que las acacias, y que ya había demostrado éxito en Sudáfrica (Marchante et al, 2017). Este tipo de actuaciones, aunque requieren de una gran inversión en investigación para minimizar los riesgos, a largo plazo son más sostenibles que los controles mecánicos o químicos, ya que permiten mantener un equilibrio en los ecosistemas y reducir los impactos de la especie invasora. No obstante, en la mayoría de los casos, la erradicación completa es difícil de conseguir.

## CONCLUSIONES

Desde tiempos remotos los seres humanos hemos trasladado especies desde unas regiones a otras por causas muy diversas que van desde su uso como alimento a la compañía que nos ofrecen, pasando por la atracción estética que las especies exóticas nos proporcionan. Actualmente, el comercio global y el desarrollo de grandes infraestructuras de comunicación han puesto en contacto regiones biogeográficas que antes se encontraban físicamente separadas, lo cual ha propiciado una aceleración en la introducción y el establecimiento de especies fuera de sus regiones de origen.

Algunas especies exóticas, sobre todo cuando se introducen en gran abundancia y con una elevada frecuencia, se expanden a gran velocidad y se las considera invasoras. La capacidad de una especie introducida de convertirse en invasora en un nuevo ecosistema depende tanto de características ecológicas propias que favorecen su capacidad de colonización como de la interacción con las especies nativas. En general, los ecosistemas más bien conservados, menos perturbados y con mayor diversidad de especies ofrecen mayor resistencia a las invasiones. Muchas especies invasoras causan impactos en la conservación de la naturaleza y ocasionan daños y pérdidas en sectores tan variados como la agricultura, la ganadería y la pesca, el turismo o la salud pública. Por tanto, su gestión debe ser transversal.

El avance en la gestión de las especies invasoras depende en gran medida del conocimiento generado por la ciencia básica, que nos permite comprender los mecanismos ecológicos implicados en su capacidad



de establecerse y expandirse con tanto éxito. Solo a través de investigaciones rigurosas podremos anticiparnos a futuras invasiones y desarrollar estrategias eficaces de prevención, detección temprana y control, minimizando los impactos ecológicos, socioeconómicos y sanitarios que ocasionan, y garantizando la resiliencia de los ecosistemas frente a este desafío global.

## AGRADECIMIENTOS

Este artículo se incluye en el marco de los proyectos RADIOPOPO (PID2021-122690OB-I00), InvaNET (RED2022-134338-T), DYNAMO (PID2023-152653OA-C22) financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER/UE, *Bexyl* (Proyecto 101060593) financiado por la EU en la convocatoria HORIZON-CL6-2021-FARM-2FORK-01-04 y DesFutur financiado por la Fundación Biodiversidad (PRTR/NextGenerationEU). Agradecemos a R. Morón una lectura crítica de una primera versión del manuscrito y a M. Delibes las sugerencias y correcciones realizadas.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores/as de este artículo declaran no tener ningún tipo de conflicto de intereses respecto a lo expuesto en el presente trabajo.

## GLOSARIO Y DEFINICIONES DE TÉRMINOS USADOS EN ESTE ARTÍCULO:

Especie exótica o introducida: especie transportada por los seres humanos a una región donde no hubiera llegado por sus propios medios de dispersión.

Especie invasora: especie introducida que se establece y se expande en poco tiempo en una nueva región y causa impactos ecológicos o socioeconómicos negativos.

Establecimiento de una especie exótica: proceso por el que una especie introducida se reproduce y asienta en el medio natural sin necesidad de cuidados (ej. riego, alimentación).

Invasión biológica: causas y consecuencias de la introducción de una especie exótica.

Potencial invasor: capacidad que una especie posee de convertirse en invasora a consecuencia de sus rasgos biológicos y asociación con actividades humanas.

Presión de propágulos: cantidad y frecuencia con la que se introducen especies exóticas en una nueva región. Puede referirse tanto a individuos adultos como a sus formas reproductivas (ej. semillas, esporas, huevos, larvas, etc).

Servicios ambientales: beneficios que los ecosistemas y la biodiversidad aportan a los seres humanos en cuanto a la provisión de bienes materiales e inmateriales, la regulación de los fenómenos ambientales y el sostén de la calidad de vida.

Modo de introducción: manera en que las especies exóticas son trasladadas deliberada o accidentalmente desde su región de origen.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Angulo, E., Ballesteros-Mejia, L., Novoa, A., Duboscq-Carra, V. G., Diagne, C. & Courchamp, F. (2021). Economic costs of invasive alien species in Spain. *NeoBiota*, 67, 267–297. <https://doi.org/10.3897/neobiota.67.59181>
2. Bartomeus, I., Vilà, M. & Santamaría, L. (2008). Contrasting effects of invasive plants in plant-pollinator networks. *Oecologia*, 155(4), 761–770. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0946-1>
3. Bayón, Á., Godoy, O., Maurel, N., Van Kleunen, M. & Vilà, M. (2021). Proportion of non-native plants in urban parks correlates with climate, socioeconomic factors and plant traits. *Urban For. Urban Green.*, 63, 127215. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127215>
4. Beaury, E. M., Finn, J. T., Corbin, J. D., Barr, V. & Bradley, B. A. (2020). Biotic resistance to invasion is ubiquitous across ecosystems of the United States. *Ecology Letters*, 23, 476–482. <https://doi.org/10.1111/ele.13446>



5. Belmonte, J. & Vilà, M. (2004). Atmospheric invasion of non-native pollen in the Mediterranean region. *Am. J. Bot.*, 91(8), 1243–1250. <https://doi.org/10.3732/ajb.91.8.1243>
6. BOE. (2019). Real Decreto 216/2019, de 29 de marzo, por el que se aprueba la lista de especies exóticas invasoras preocupantes para la región ultraperiférica de las islas Canarias y por el que se modifica el Real Decreto 630/2013, de 2 de agosto, por el que se regula el Catálogo español de especies exóticas invasoras. BOE 77 (Sec. I.): 32902–32921.
7. Bradley, B. A., Beaury, E. M., Gallardo, B., Ibáñez, I., Jarnevich, C., Morelli, T. L., Sofaer, H. R., Sorte, C. J. & Vilà, M. (2024). Observed and Potential Range Shifts of Native and Nonnative Species with Climate Change. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 55(1), 23–40. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102722-013135>
8. Calviño-Cancela, M., Chas-Amil, M. L., García-Martínez, E. D. & Touza, J. (2016). Wildfire risk associated with different vegetation types within and outside wildland-urban interfaces. *For. Ecol. Manage.*, 372, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.002>
9. Castro-Díez, P., Vaz, A. S., Silva, J. S., Van Loo, M., Alonso, Á., Aponte, C., Bayón, Á., Bellingham, P. J., Chiuffo, M. C., DiManno, N., Julian, K., Kandert, S., La Porta, N., Marchante, H., Maule, H. G., Mayfield, M. M., Metcalfe, D., Monteverdi, M. C., Núñez, M. A., ... Godoy, O. (2019). Global effects of non-native tree species on multiple ecosystem services. *Biological Reviews/Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 94(4), 1477–1501. <https://doi.org/10.1111/brv.12511>
10. Chan, F. T., Stanislawczyk, K., Sneekes, A. C., Dvoretzky, A., Gollasch, S., Minchin, D., David, M., Jelmert, A., Albretsen, J. & Bailey, S. A. (2018). Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks. *Global Change Biology*, 25(1), 25–38. <https://doi.org/10.1111/gcb.14469>
11. Clavero, M., Franch, N., Bernardo-Madrid, R., López, V., Abelló, P., Queral, J. M. & Mancinelli, G., 2022. Severe, rapid and widespread impacts of an Atlantic blue crab invasion. *Marine Pollution Bulletin*, 176, p.113479. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113479>
12. Crosby, A. W. (1988). *Imperialismo ecológico. La expansión biológica de Europa 900-1900*. Crítica, Barcelona.
13. Diagne, C., Leroy, B., Vaissière, A., Gozlan, R. E., Roiz, D., Jarić, I., Salles, J., Bradshaw, C. J. A. & Courchamp, F. (2021). High and rising economic costs of biological invasions worldwide. *Nature*, 592(7855), 571–576. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03405-6>
14. Duncan, R. P., Blackburn, T. M. & Cassey, P. (2006). Factors affecting the release, establishment and spread of introduced birds in New Zealand. In R. B. Allen & W. G. Lee (Eds.), *Biological Invasions in New Zealand* (pp. 137–154). Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/3-540-30023-6\\_9](https://doi.org/10.1007/3-540-30023-6_9)
15. Ferreira, A., Coelho, C., Walsh, R., Shakesby, R., Ceballos, A. & Doerr, S. (2000). Hydrological implications of soil water-repellency in Eucalyptus globulus forests, north-central Portugal. *Journal of Hydrology*, 231–232, 165–177. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00192-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00192-X)
16. Galán-Díaz, J., de la Riva, E.G., Parker, I.M., Leiva, M.J., Bernardo-Madrid, R. & Vilà, M. (2020). Plant community assembly in invaded recipient californian grasslands and putative donor grasslands in Spain. *Diversity*, 12, 193. <https://doi.org/10.3390/d12050193>
17. Gallardo, B., Zieritz, A. & Aldridge, D. C. (2015). The importance of the human footprint in shaping the global distribution of terrestrial, freshwater and marine invaders. *PLoS ONE*, 10(5), e0125801. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125801>
18. Gallardo, B., Bacher, S., Barbosa, A. M., Gallien, L., González-Moreno, P., Martínez-Bolea, V., Sorte, C., Vimercati, G. & Vilà, M. (2024). Risks posed by invasive species to the provision of ecosystem services in Europe. *Nature Communications* 15(1), 2631. <https://www.nature.com/articles/s41467-024-46818-3>
19. Gervilla, C., Rita, J., & Cursach, J. (2019). Contaminant seeds in imported crop seed lots: a non-negligible human-mediated pathway for introduction of plant species to islands. *Weed Research*, 59(3), 245–253. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/wre.12362>

20. González-Moreno, P., Gassó, N., Pino, J. & Vilà, M. (2013a). Landscape context modulates plant invasions in Mediterranean forest edges. *Biological Invasions*, 15(3), 547–557. <https://doi.org/10.1007/s10530-012-0306-x>
21. González-Moreno, P., Pino, J., Carreras, D., Basnou, C., Fernández-Rebollar, I. & Vilà, M. (2013b). Quantifying the landscape influence on plant invasions in Mediterranean coastal habitats. *Landscape Ecology*, 28(5), 891–903. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9857-1>
22. González-Moreno, P., Andelković, A. A., Adriaens, T., Botella, C., Demetriou, J., Bastos, R., Bertolino, S., López-Cañizares, C., Essl, F., Fišer, Ž., Glavendekić, M., Herremans, M., Hulme, P. E., Jani, V., Katsada, D., Kleitou, P., La Porta, N., Lapin, K., López-Darias, M., ... Pocock, M. J. O. (2025). Citizen science platforms can effectively support early detection of invasive alien species according to species traits. *People and Nature*, 7(1), 278–294. <https://doi.org/10.1002/pan3.10767>
23. Hulme, P. E., Bacher, S., Kenis, M., Klotz, S., Kühn, I., Minchin, D., Nentwig, W., Olenin, S., Panov, V., Pergl, J., Pyšek, P., Roques, A., Sol, D., Solarz, W. & Vilà, M. (2008). Grasping at the routes of biological invasions: a framework for integrating pathways into policy. *Journal of Applied Ecology*, 45(2), 403–414. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01442.x>
24. Lenzner, B., Latombe, G., Schertler, A., Seebens, H., Yang, Q., Winter, M., Weigelt, P., Van Kleunen, M., Pyšek, P., Pergl, J., Kreft, H., Dawson, W., Dullinger, S. & Essl, F. (2022). Naturalized alien floras still carry the legacy of European colonialism. *Nature Ecology & Evolution*, 6(11), 1723–1732. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01865-1>
25. Marchante, H., López-Núñez, F. A., Freitas, H., Hoffmann, J. H., Impson, F. & Marchante, E. (2017). First report of the establishment of the biocontrol agent *Trichilogaster acaciaelongifoliae* for control of invasive *Acacia longifolia* in Portugal. *EPPO Bulletin*, 47(2), 274–278. <https://doi.org/10.1111/epp.12373>
26. Maron, J. L., Vilà, M. & Arnason, J. (2004). Loss of enemy resistance among introduced populations of St. John's Wort (*Hypericum perforatum*). *Ecology*, 85(12), 3243–3253. <https://doi.org/10.1890/04-0297>
27. Matesanz, S., Gianoli, E. & Valladares, F. (2010). Global change and the evolution of phenotypic plasticity in plants. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1206(1), 35–55. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05704.x>
28. Monguilod 2023. Risks posed by invasive mammals to the emergence and spread of zoonotic diseases. Master thesis, Universidad de Zaragoza. 60 p.
29. Mogollón, S. L., Zilio, M. I., Buitrago, E. M., Caraballo, M. Á. & Yñiguez, R. (2023). Economic impact of *Rugulopteryx okamurae* (Dictyotales, Ochrophyta) along the Andalusian coastline: the case of Tarifa, Spain. *Wetlands Ecology and Management*, 32(1), 19–32. <https://doi.org/10.1007/s11273-023-09951-2>
30. Padrón, B., Nogales, M., Traveset, A., Vilà, M., Martínez-Abraín, A., Padilla, D. P. & Marrero, P. (2010). Integration of invasive *Opuntia* spp. by native and alien seed dispersers in the Mediterranean area and the Canary Islands. *Biological Invasions*, 13(4), 831–844. <https://doi.org/10.1007/s10530-010-9872-y>
31. Pyšek, P., Hulme, P. E., Simberloff, D., Bacher, S., Blackburn, T. M., Carlton, J. T., Dawson, W., Essl, F., Foxcroft, L. C., Genovesi, P., Jeschke, J. M., Kühn, I., Liebhold, A. M., Mandrak, N. E., Meyerson, L. A., Pauchard, A., Pergl, J., Roy, H. E., Seebens, H., ... Richardson, D. M. (2020). Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews/Philosophical Society*, 95(6), 1511–1534. <https://doi.org/10.1111/brev.12627>
32. Saponari, M., Giampetruzzi, A., Loconsole, G., Boscia, D. & Saldarelli, P. (2018). *Xylella fastidiosa* in Olive in Apulia: Where We Stand. *Phytopathology*, 109(2), 175–186. <https://doi.org/10.1094/phyto-08-18-0319-fi>
33. Seebens, H., Blackburn, T. M., Dyer, E. E., Genovesi, P., Hulme, P. E., Jeschke, J. M., Pagad, S., Pyšek, P., Winter, M., Arianoutsou, M., Bacher, S., Blasius, B., Brundu, G., Capinha, C., Celesti-Grapo, L., Dawson, W., Dullinger, S., Fuentes, N., Jäger, H., ... Essl, F. (2017). No saturation in the accumulation of alien species worldwide. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms14435>



34. Seebens, H., Bacher, S., Blackburn, T. M., Capinha, C., Dawson, W., Dullinger, S., Genovesi, P., Hulme, P. E., van Kleunen M., Kühn, I., Jeschke, J. M., Lenzner, B., Liebold, A. M. Pattison, Z., Pergl, J., Pyšek, P. Winter, M. & Essl, F. (2021). Projecting the continental accumulation of alien species through to 2050. *Global Change Biology*, 27(5), 970-982. <https://doi.org/10.1111/gcb.15333>
35. Silva-Rocha, I., Salvi, D., Sillero, N., Mateo, J. A. & Carretero, M. A. (2015). Snakes on the Balearic Islands: An Invasion Tale with Implications for Native Biodiversity Conservation. *PLoS ONE*, 10(4), e0121026. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121026>
36. Souty-Grosset, C., Anastácio, P. M., Aquiloni, L., Banha, F., Choquer, J., Chucholl, C. & Tricarico, E. (2016). The red swamp crayfish *Procambarus clarkii* in Europe: Impacts on aquatic ecosystems and human well-being. *Limnologica*, 58, 78-93. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2016.03.003>
37. Stuart, K. C., Hofmeister, N. R., Zichello, J. M. & Rollins, L. A. (2023). Global invasion history and native decline of the common starling: insights through genetics. *Biological Invasions*, 25(5), 1291-1316. <https://doi.org/10.1007/s10530-022-02982-5>
38. Vilà, M. (2011). Prickly pear cacti, a spiny issue. In: *Weird conquerors – invasive plants and animals in Europe* (ed. Nentwig, W.). Haupt-Natur, Bern.
39. Vilà, M., Basnou, C., Pyšek, P., Josefsson, M., Genovesi, P., Gollasch, S., Nentwig, W., Olenin, S., Roques, A., Roy, D. & Hulme, P. E. (2009). How well do we understand the impacts of alien species on ecosystem services? A pan-European, cross-taxa assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(3), 135-144. <https://doi.org/10.1890/080083>
40. Vilà, M., Dunn, A. M., Essl, F., Gómez-Díaz, E., Hulme, P. E., Jeschke, J. M., Núñez, M. A., Ostfeld, R. S., Pauchard, A., Ricciardi, A. & Gallardo, B. (2021). Viewing Emerging Human Infectious Epidemics through the Lens of Invasion Biology. *BioScience*, 71(7), 722-740. <https://doi.org/10.1093/biosci/biab047>
41. Vilà, M., Espinar, J. L., Hejda, M., Hulme, P. E., Jarošík, V., Maron, J. L., Pergl, J., Schaffner, U., Sun, Y. & Pyšek, P. (2011). Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecology Letters*, 14(7), 702-708. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01628.x>
42. Vilà, M., Maron, J. L., & Marco, L. (2004). Evidence for the enemy release hypothesis in *Hypericum perforatum*. *Oecologia*, 142(3), 474-479. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1731-z>

---

**Si desea citar nuestro artículo:**

Vilà M, Gallardo B, González-Moreno P. Invasiones biológicas por especies exóticas. *RACSG*.2025;113(01):108-123. [rac.2025.113.1.org08](https://doi.org/10.113.1.org08)



REAL ACADEMIA  
DE **CIENCIAS EXACTAS,**  
**FÍSICAS Y NATURALES**  
DE ESPAÑA

— **R E V I S T A**  
**C I E N T Í F I C A**

REAL ACADEMIA  
DE CIENCIAS EXACTAS,  
FÍSICAS Y NATURALES  
DE ESPAÑA

— R E V I S T A  
C I E N T Í F I C A