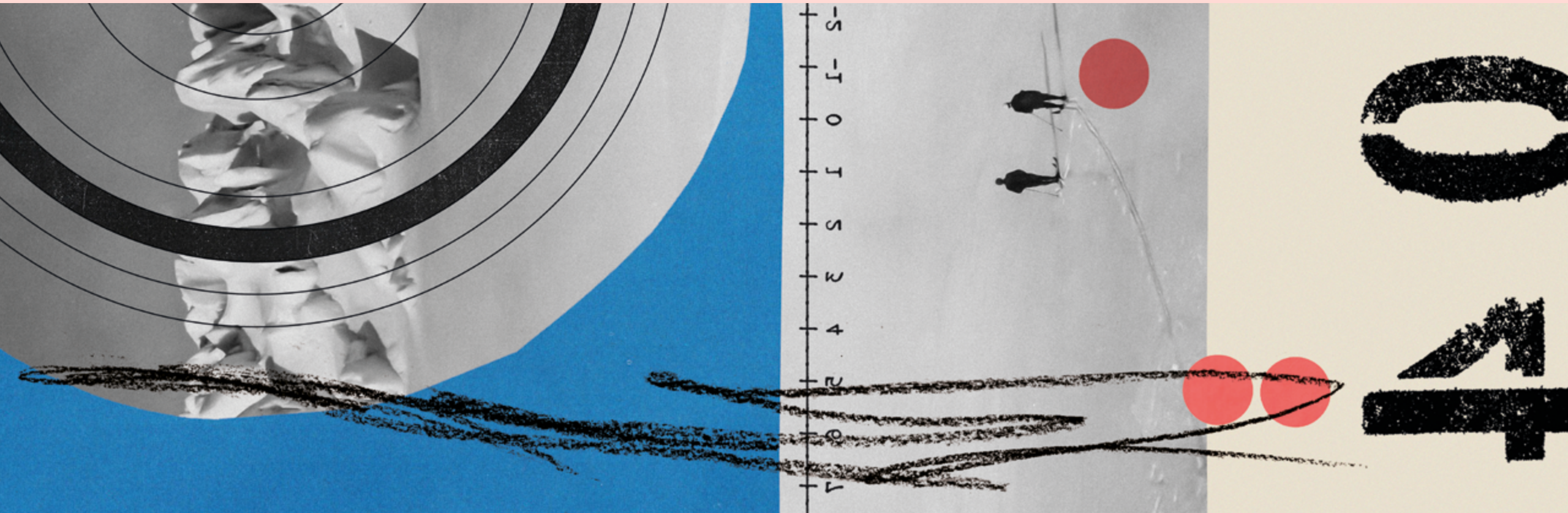


# ASOMBROSA

Ciencia que explora, transforma y mejora la vida

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS DE ESPAÑA & KYNDRYL

DICIEMBRE DE 2025



# PRÓLOGO

## MUY HUMANOS

# BLOQUE I

## Inteligencia artificial

Verónica Bolón / José Duato

## Ciberseguridad y criptografía

Consuelo Martínez / David Ríos

## Optimización de procesos

María Ángeles Gil / Wenceslao González Manteiga

# BLOQUE II

## Computación e información cuánticas

Ignacio Cirac / David Pérez García

## Nanociencia

Nazario Martín / María Varela del Arco

## Visión del cosmos

Jon Marcaide / Jesús Martínez Frías

## Energía sostenible

Hermenegildo García / Inmaculada Ortiz

# BLOQUE III

## Sostenibilidad y biodiversidad

Miguel Delibes de Castro / Pedro Jordano

## Cambio climático

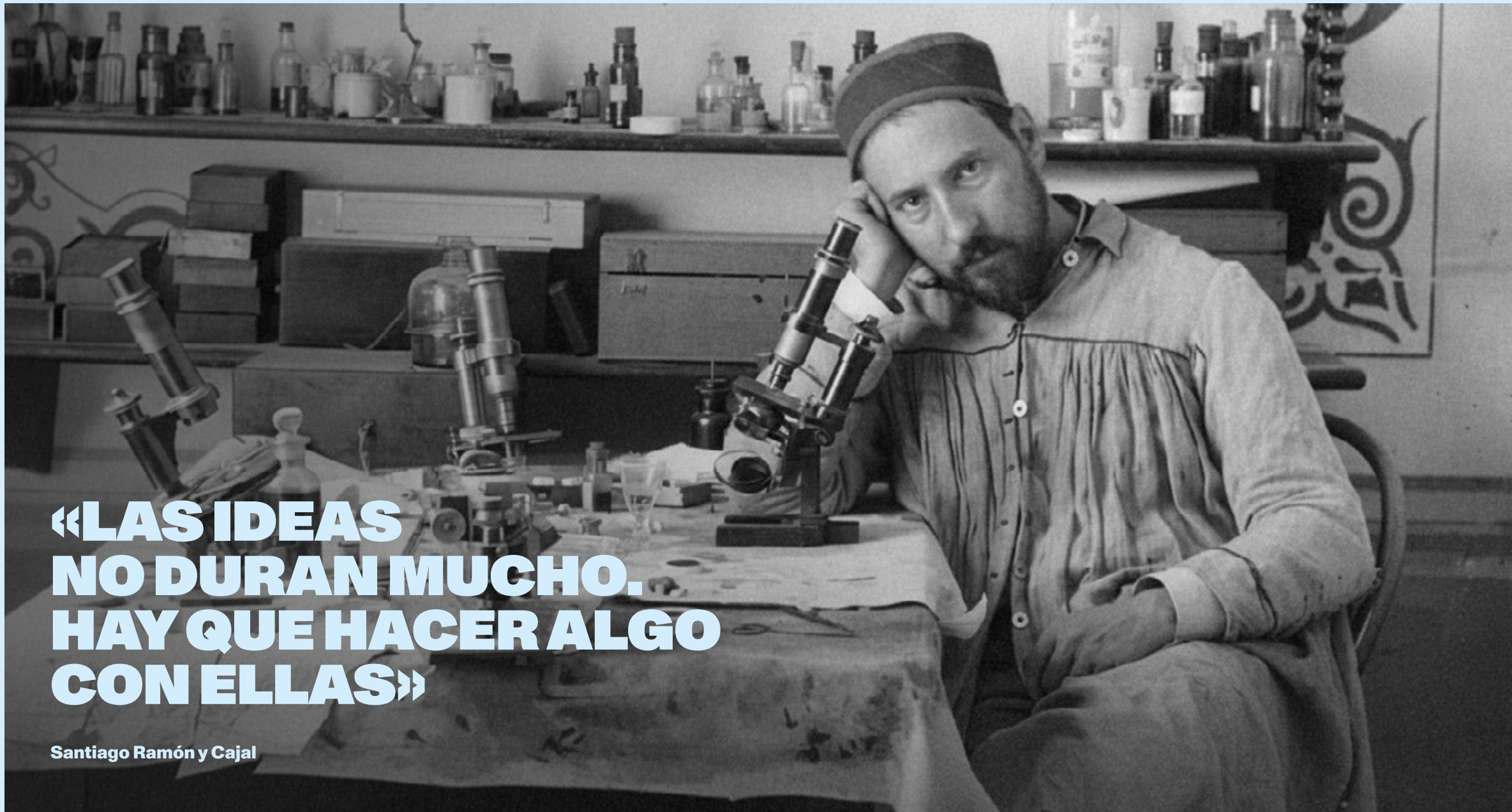
Salud Deudero / José Manuel Moreno

## Neurociencia y cerebro

Juan Lerma / Guillermina López-Bendito

# AYER Y MAÑANA

# EPÍLOGO



**«LAS IDEAS  
NO DURAN MUCHO.  
HAY QUE HACER ALGO  
CON ELLAS»**

Santiago Ramón y Cajal

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

#### EPÍLOGO

# CIENCIA Y EMPRESA: UN COMPROMISO.



Ana María Crespo.  
Presidenta de la RAC.



David Soto.  
Presidente de Kyndryl España y Portugal.

Desde su fundación en 1847, la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España ha trabajado con un propósito claro: fomentar el estudio y la investigación de la ciencia y sus aplicaciones y promover su conocimiento. Hacerla comprensible, cercana, inspiradora. Convertirla en una herramienta de transformación. Que sea accesible. Que cada vez más jóvenes apuesten por carreras científicas.

Hoy, ese propósito se renueva y se fortalece a través de la colaboración con Kyndryl, una compañía que comparte nuestra convicción de que la ciencia no solo explica el mundo. También lo mejora.

En un momento en que los desafíos globales exigen respuestas innovadoras, la unión entre la investigación científica y la innovación empresarial es más necesaria que nunca. Esta publicación nace de esa convicción: que el conocimiento científico y la capacidad transformadora de la empresa caminan de la mano para impulsar la innovación.

Este proyecto de la RAC y Kyndryl es más que una colaboración. Es una declaración de principios. Una apuesta por una ciencia que sale de los laboratorios y se proyecta hacia la vida. Que dialoga con la tecnología, con la economía, con la educación. Que es motor de progreso para las personas, las

organizaciones y la sociedad. Y que nos invita a hablar más sobre ciencia en nuestro día a día: en el trabajo, en casa, en una cena con amigos.

A través de estas páginas, queremos compartir algunos de los avances más relevantes en distintas disciplinas científicas, pero también invitar a la reflexión. A abrir espacios de conversación sobre el papel de la ciencia en nuestras vidas. A reconocer el valor de la colaboración entre disciplinas que, lejos de ser ajenas, se enriquecen mutuamente. Porque las grandes innovaciones científicas —como las que se cuentan en esta publicación— nacen de la unión.

En definitiva, este proyecto acerca la ciencia a nuestro día a día desde la fascinación, el desafío y la dedicación de nuestros académicos, como muestra del compromiso de la RAC y Kyndryl con la investigación y la sociedad.

Con el conocimiento y la realidad.

Con la ciencia y la vida.

«Unir investigación científica e innovación empresarial es más necesario que nunca»

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### **BLOQUE II**

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### **BLOQUE III**

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### **AYER Y MAÑANA**

## **EPÍLOGO**

Muy humanos

# **MARAVILLARSE, ESA CIENCIA.**



## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

Inteligencia  
artificial

Ciberseguridad  
y criptografía

Optimización  
de procesos

#### **BLOQUE II**

Computación  
e información  
cuánticas

Nanociencia

Visión del  
cosmos

Energía  
sostenible

#### **BLOQUE III**

Sostenibilidad  
y biodiversidad

Cambio  
climático

Neurociencia  
y cerebro

### **AYER Y MAÑANA**

## **EPÍLOGO**

La gente de ciencia  
parece de otro planeta.  
Pero son del mismo que tú.

Personas que se hacen  
preguntas. Con hambre de  
saber, y una curiosidad que les  
lleva a vivir desde el asombro.

Como niños, prueban y fallan.  
Y vuelven a probar.  
Prueban, prueban, prueban.  
Fallan, fallan, fallan.

Al empezar este proyecto,  
les lanzamos una pregunta  
que puedes leer a continuación.

Sus respuestas son variadas,  
pero todas nos remiten  
a ese lugar de misterio.

El misterio de un átomo.  
O el de una galaxia.  
El misterio de la amistad.  
La casualidad. O la belleza.

Hay una ciencia en la vida  
que no hace falta explicar.

Es la maravilla  
que nos hace iguales.

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### **BLOQUE II**

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### **BLOQUE III**

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### **AYER Y MAÑANA**

#### **EPÍLOGO**

# ¿Cuándo fue la última vez que te maravillaste, y por qué?



José Manuel Moreno

A principios de febrero, viendo a las grullas pasar sobre mi casa camino del centro y norte de Europa. La maravilla de un nuevo ciclo de la vida se ponía en marcha, tras el invierno. Los individuos de esta especie iniciaban su migración a sitios favorables para reproducirse. El cambio climático amenaza esa "seguridad" de lo que les espera a miles de kilómetros de distancia, al haber sido seleccionados por unas pautas climáticas que ahora están en peligro.



María Varela del Arco

Hoy, escuchando una entrevista online a mi amiga Carmen Portilla, buceadora en cuevas y pionera donde las haya, récord del mundo de penetración en una cueva submarina en el túnel de la Atlántida en Lanzarote cuando ni siquiera existían tecnologías para bucearen aguas abiertas con seguridad. Cómo se puede resumir en 50 minutos tantos logros con tanta sencillez.



Consuelo Martínez

Me maravillo todos los días cuando veo a un niño pequeño, especialmente a un bebé. Me parece lo más hermoso del mundo y me admira que sean tan perfectos. Creo que son nuestro principal tesoro, que tenemos que proteger y cuidar, pero, desgraciadamente no es lo que ocurre en demasiadas ocasiones.



Miguel Delibes de Castro

Hace unos días, cuando mi nieto de dos años recién cumplidos me gritó en un jardín: «¡Abuelo, un chinche de campo!, ¿lo cogemos?». Me conmovió comprobar en esa personita el interés por todo lo vivo que tenemos desde niños, y que a menudo desaparece con el tiempo.



Wenceslao González Manteiga

Cuando en el homenaje por el cumpleaños de mis 60 años se organizó un acto en donde se unió mi familia científica con mi esposa y mis hijos. Todo fue por sorpresa, muy emocionante y maravilloso.



Pedro Jordano

La semana pasada, un día de tormenta, viendo un grupo de vencejos comunes y varios vencejos pálidos volando junto a la torre de Santa Ana, en Triana, dándoles la luz del sol frente al fondo gris plomo de la tormenta.



María Ángeles Gil

Cantando en Hondarribia hace unos meses con mis amigos corales de la época de estudiante en Valladolid. Las voces están, en general, algo más flojas, pero la ilusión y el cariño siguen bien potentes.



José Duato

Esta misma semana, cuando descubrí el enorme potencial de determinada empresa española, que puede llegar a contribuir notablemente a la independencia tecnológica de Europa respecto a Estados Unidos o China.



Jon Marcaide

Hace dos meses cuando subí en helicóptero a los glaciares alrededor del Mount Cook en Nueva Zelanda Sur. Porque son grandiosos y porque bajo un cielo azul sentí allí arriba un inmenso silencio y belleza.



Jesús Martínez Frías

Personal: cuando mi hijo consiguió el Premio extraordinario de tesis doctoral (2025). Científico: la campaña científica, alcanzando la cumbre del volcán Pichi Pichu, en Perú (2024).



Verónica Bolón

Esta semana, al impartir una charla sobre la inteligencia artificial verde, por la implicación del público, sus preguntas y el 'feedback' tan maravilloso que recibí.



Salud Deudero

Hace dos días, al contemplar la exquisita armonía de la naturaleza en las azules aguas del Parque Nacional de Cabrera.



David Ríos

Escuchando 'Berlín', de Coque Malla, bajando hacia Pantín por la carretera de la costa. Me sentí en paz, en mucha paz. Para toda la vida.



Guillermina López-Bendito

Hace unas semanas, al observar cómo una red neuronal se autoorganiza en el cerebro embrionario: la belleza de lo espontáneo.



Nazario Martín

Cuando nació mi hija Laura, la pequeña. Ya me había maravillado antes con el nacimiento de Helena... No es preciso explicar el porqué.



Juan Lerma

Cuando visité las pirámides de Egipto, por su diseño y perfección con 4.500 años.



Hermenegildo García

Cada vez que veo un gesto altruista y de amor gratuito me quedo asombrado y agradecido.



Inmaculada Ortiz

Al ver agua en el desierto.



Ignacio Cirac

Ayer, al ver los Alpes desde lo alto.



David Pérez García

Ayer, y siempre, al mirar las estrellas.

**PRÓLOGO**

**MUY  
HUMANOS**

**BLOQUE I**

Inteligencia  
artificial

Ciberseguridad  
y criptografía

Optimización  
de procesos

**BLOQUE II**

Computación  
e información  
cuánticas

Nanociencia

Visión del  
cosmos

Energía  
sostenible

**BLOQUE III**

Sostenibilidad  
y biodiversidad

Cambio  
climático

Neurociencia  
y cerebro

**AYER Y  
MAÑANA**

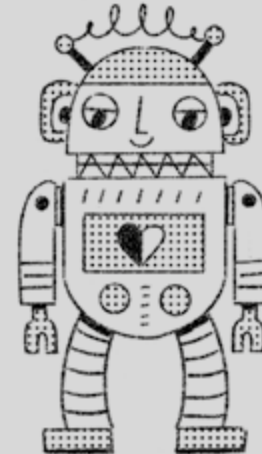
**EPÍLOGO**



**Bloque I**

# **TODO LO QUE SUMA**

Disciplinas matemáticas  
que mejoran nuestra vida.



## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### **BLOQUE II**

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### **BLOQUE III**

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### **AYER Y MAÑANA**

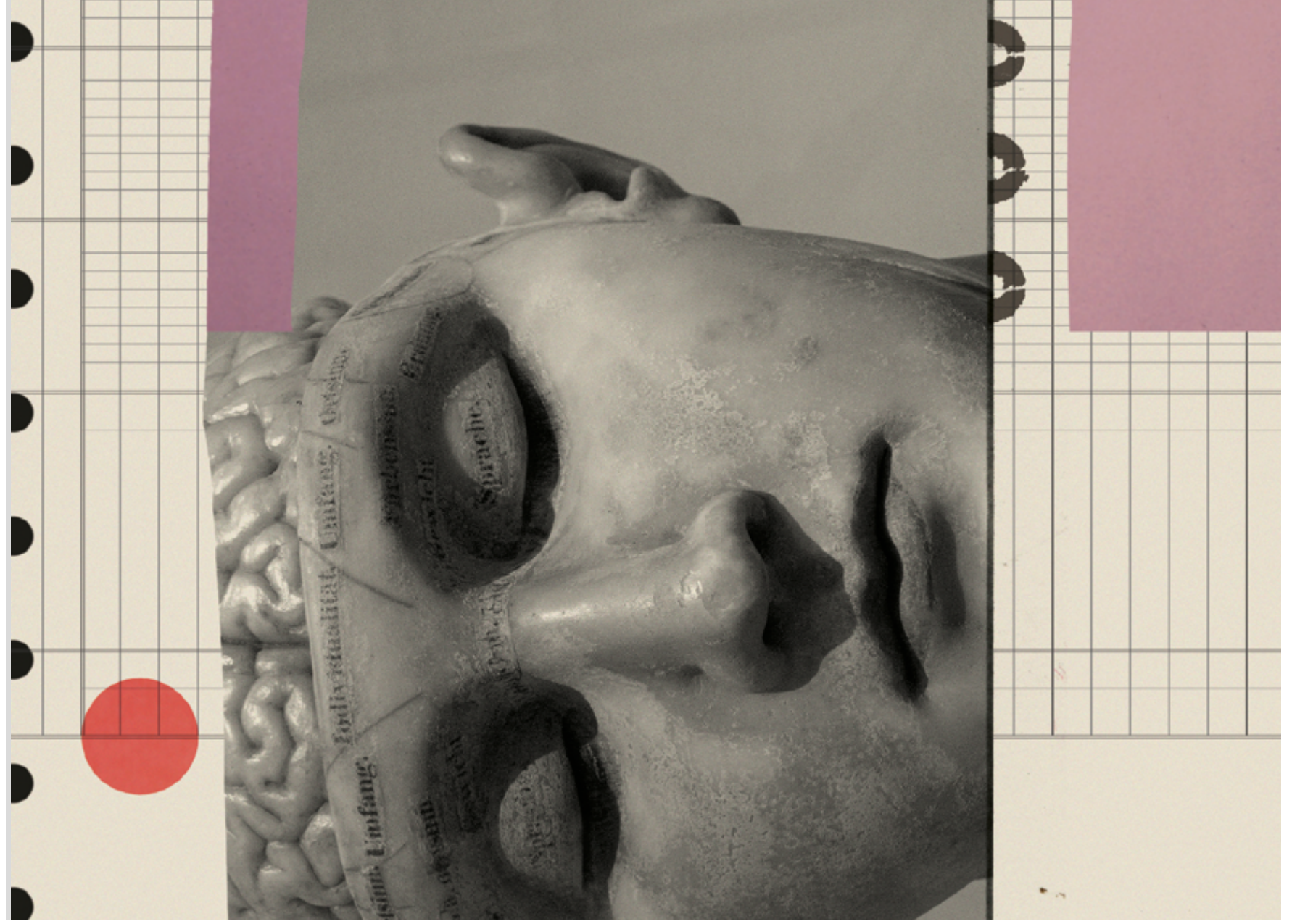
## **EPÍLOGO**

# INTELIGENCIA ARTIFICIAL

## Una huella oculta

Algoritmos verdes para una inteligencia artificial sostenible.

**Veronica Bolón y José Duato.**





**Verónica Bolón**



**Jose Duato**

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### **BLOQUE II**

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### **BLOQUE III**

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### **AYER Y MAÑANA**

## **EPÍLOGO**

# Verónica Bolón

**Carballo, 4 de febrero de 1984**

**Ingreso en la RAC: 26 de octubre de 2022**

Verónica Bolón es ingeniera informática y doctora en Informática por la Universidade da Coruña (UDC), donde ejerce como profesora titular e investigadora en el Centro de Investigación TIC. También dirige la Cátedra UDC-INDI-TEX de IA en Algoritmos Verdes y del Máster en Inteligencia Artificial de la UIMP.

Su labor se centra en el desarrollo de algoritmos de aprendizaje automático aplicados a la inteligencia artificial, con especial atención a la sostenibilidad y la eficiencia energética, en lo que se conoce como «algoritmos verdes».

Sus investigaciones tienen aplicaciones en ámbitos como la medicina, la ingeniería y la educación. Ha publicado más de cien artículos científicos y es autora de dos libros. Su tesis doctoral recibió el premio Frances Allen de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial (AEPIA) en 2015.

Entre otros, ha sido galardonada con el Premio Dona TIC Revelación (2020), el Premio Ada Byron del Colegio Profesional de Ingeniería Informática de Galicia (2023) y el Premio Nacional de Investigación María Andresa Casamayor (2024).

Es académica de número de la Academia Joven de España y académica correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España. Coordina el nodo de A Coruña del proyecto Inspira STEAM, que promueve las vocaciones científico-tecnológicas entre las niñas.

**Saber más**

Personal y transferible.

**Un color.**

Verde.

**Una palabra.**

Perseverancia.

**Una ciudad.**

San Diego.

**Plato favorito.**

Pizza.

**Un recuerdo de la infancia.**

Las fiestas de mi pueblo. Mi ilusión por ir con ropa nueva y que nunca me cansaba de subirme en las atracciones o la felicidad que sentía si me conseguían un peluche.

**Su remedio antiestrés.**

Una copa de vino con amigas.

**Invento favorito de la ciencia.**

El ordenador.

**Una planta.**

Orquídea.

**El mayor reto de su carrera profesional, hasta la fecha.**

Ser capaz de compaginar mi vida profesional con mi vida personal después de ser madre, y que esto no impactase negativamente en mi desarrollo profesional.

**Un miedo.**

La muerte.

**Persona que inspira sus días.**

Mis hijos.

**¿Una máxima?**

Mantenerme curiosa.

**Cualidad que más aprecia en sus colegas de investigación.**

La eficiencia.

**Deporte favorito.**

Tenis.

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### **BLOQUE II**

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### **BLOQUE III**

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### **AYER Y MAÑANA**

## **EPÍLOGO**

# José Duato

**Alberic, 16 de agosto de 1958**

**Ingreso en la RAC: 13 de noviembre de 2019**

José Francisco Duato es doctor en Ingeniería Industrial por la Universitat Politècnica de València, catedrático de Arquitectura y Tecnología de Computadores en la misma universidad y un referente internacional en redes de interconexión.

Sus técnicas de encaminamiento adaptativo han sido fundamentales en el diseño de supercomputadores como el Cray T3E, el IBM BlueGene/L y el microprocesador Alpha 21364. Asimismo, ha desarrollado técnicas de control de congestión incorporadas en estándares como Advanced Switching InterConnect y Datacenter Ethernet.

Duato lideró el desarrollo de rCUDA, una tecnología que permite la virtualización remota de GPUs, optimizando el uso de aceleradores en ‘clusters’ de alto rendimiento.

Es autor principal del libro ‘Interconnection Networks: An Engineering Approach’, obra de referencia en su campo. Con más de cuatrocientas sesenta publicaciones, ha dirigido veintiséis tesis doctorales.

Entre sus reconocimientos destacan el Premio Rey Jaime I de Nuevas Tecnologías (2006) y el Premio Nacional de Investigación Julio Rey Pastor (2009). Es miembro numerario de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España.

### **Saber más**

Personal y transferible.

**Lo primero que viene a su mente cuando lee la palabra «blanco».**

Mente en blanco.

**Un sonido.**

Dos: oleaje y ruido blanco.

**Un pueblo.**

Grindelwald.

**Postre favorito.**

Dos: tiramisú y uva moscatel.

**Recuerdo más reciente que quiere atesorar.**

Las lágrimas de emoción de un amigo y compañero al recordar que ya llevábamos 31 años juntos.

**Qué le genera estrés.**

La incapacidad de resolver problemas cuando depende de otras personas.

**Inventor /a favorito de la ciencia.**

En mi infancia, Isaac Peral.

**Mayor logro de su carrera profesional, hasta la fecha.**

Dos: haber desarrollado una teoría (y la metodología de aplicación asociada) que se ha utilizado en el diseño de múltiples microprocesadores y supercomputadores

(entre ellos, el más potente del mundo) y haber escrito un capítulo de libro de tal calidad que los autores del libro más vendido a nivel internacional en mi campo de trabajo eliminaron de su libro el capítulo correspondiente e incluyeron el que yo había redactado como apéndice.

**Una esperanza.**

Que detengamos el deterioro de los recursos naturales.

**Dónde encuentra la inspiración.**

En ningún lugar en concreto. Aparece al haber entrenado el cerebro para la creatividad.

**Un mentor profesional.**

Puedo mencionar a personas que han sido la inspiración o detonante para mejorar mi trayectoria. Mateo Valero, William J. Dally o Manuel López Pellicer.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Un binomio en busca de la sostenibilidad de lo invisible.

Menos datos, más sentido, menos impacto ambiental.

Mientras la inteligencia artificial coloniza la economía y la vida cotidiana, pocos miran hacia la energía que la alimenta. Verónica Bolón y José Duato, referentes internacionales en IA sostenible y computación eficiente, trabajan desde Galicia y Valencia para reducir la huella de la inteligencia artificial sin frenar su avance. Frente al ruido de los grandes modelos, ellos apuestan por algoritmos más ligeros, explicables y sostenibles, que hagan compatible el progreso con el planeta.

La inteligencia artificial y la computación avanzada se han convertido de un día para otro en parte de nuestra cotidianidad. Es difícil participar en una conversación de sobremesa o un debate de cualquier materia donde no se acabe hablando de la omnipresente tecnología que se esconde detrás de las siglas más usadas del primer cuarto de siglo.

Pero este vasto ecosistema y su frenético desarrollo tienen matices que rara vez se abordan en debates convencionales. José Duato y Verónica Bolón, dos de los científicos

más destacados del país en sus respectivas áreas, tienen una visión que rompe con los discursos habituales sobre la IA con un objetivo común: la sostenibilidad y eficiencia de una herramienta que ya está transformando el mundo.

«Si eliminamos información redundante, reducimos drásticamente el gasto computacional»

**Verónica Bolón**

Al margen de cuestiones fundamentales como la ética o la regulación, hay un aspecto menos tratado que va a ser fundamental en la era del dato: la estructura energética que alimenta el almacenamiento, análisis y procesamiento masivo de información que requiere la IA.

La Agencia Internacional de la Energía advierte del aumento sostenido del consumo eléctrico asociado a los centros de proceso, impulsado en parte por el crecimiento de la inteligencia artificial. La institución sostiene que la demanda energética de los centros de datos optimizados para IA se multiplicará por más de cuatro para 2030. En Estados Unidos, el consumo de energía de estos centros representará casi la mitad del crecimiento de la demanda eléctrica entre 2025 y 2030.

Pero sería injusto obviar el papel de los centros de datos en el progreso económico y tecnológico. Muchas grandes

«Desarrollamos alternativas a las redes neuronales de la IA que tengan las propiedades deseadas de sostenibilidad y transparencia»

**José Duato**

infraestructuras incluyen estudios de viabilidad energética, acuerdos de suministro con fuentes renovables e innovaciones arquitectónicas orientadas a la eficiencia. Empresas como Google o Microsoft ya operan centros de datos alimentados en un 100% con energía renovable, y otras iniciativas pioneras, como la de Amazon Web Services, hacen de la sostenibilidad un factor competitivo. La industria sabe que su futuro también pasa por minimizar su huella ecológica.

Verónica Bolón es un referente en IA sostenible. Especialista en análisis y selección de características en conjuntos de datos masivos, lucha contra la «obesidad» de la información que alimenta los algoritmos. Parte de su investigación se centra en averiguar cómo reducir el volumen ingente de datos sin comprometer su precisión y reduciendo a la vez el consumo energético.

«Buscamos un equilibrio entre cantidad y calidad. Si eliminamos información redundante, reducimos drásticamente el gasto computacional», explica. Sus investigaciones todavía no pueden poner cifra a la reducción de energía que permitirá el uso de algoritmos más eficaces, pero sí permiten asegurar que tendrán una relevancia decisiva para las instalaciones de procesamiento.

A unos 950 kilómetros de distancia, en Valencia, José Francisco Duato está revolucionando la forma en que los sistemas de IA se comunican entre sí. Experto en redes de interconexión y arquitecturas de cálculo de alto rendimiento, dedicó más de tres décadas a mejorar el 'hardware' de los supercomputadores y centros de datos antes de centrar sus investigacio-

nes en nuevos planteamientos matemáticos que permitan el desarrollo de sistemas de IA más eficientes y transparentes. «De momento, nos hemos centrado en las redes neuronales, hemos estudiado en profundidad su funcionamiento y estamos desarrollando formulaciones alternativas que consigan una precisión similar pero que tengan las propiedades deseadas de sostenibilidad y transparencia», explica.

Tras analizar de qué forma almacena el conocimiento una red neuronal, Duato y su equipo han podido definir una alternativa que se basa en un modelo lineal que simplifica notablemente el entrenamiento y lo hace mucho más transparente sin perder precisión.

«Me gustaría que estos resultados fueran extrapolables a la IA generativa»

**José Duato**

«Este nuevo planteamiento permite reentrenar un sistema de IA sin volver a procesar todas las muestras antiguas y sin que olvide el conocimiento incluido en las mismas», explica Duato, que también ha puesto a prueba la eficiencia de sus investigaciones:

«Hemos contactado con una empresa que dispone de unas librerías que evalúan la huella de carbono de las aplicaciones que ofrecen. Han evaluado la operación de reentrenamiento de una aplicación de reconocimiento de imágenes

desarrollada con dos tecnologías alternativas: redes neuronales convolucionales y nuestros modelos matemáticos. La conclusión obtenida ha sido que la variante desarrollada con nuestros modelos consigue una precisión similar, pero es 315 veces más rápida y consume 264 veces menos energía».

Consciente de que está en el camino adecuado, matiza: «Me gustaría que estos resultados fueran directamente extrapolables a la inteligencia artificial generativa y a los grandes modelos de lenguaje. Todavía no estamos ahí, si bien está en nuestra hoja de ruta. Pero aquellas aplicaciones de inteligencia artificial que no requieren el uso de grandes modelos de lenguaje, como las utilizadas en industria 4.0 y en ciudades inteligentes, que requieren reentrenamiento frecuente para mantener los modelos actualizados, sí que pueden beneficiarse directamente de estos avances, consiguiendo así que la implantación masiva de la IA en esos sectores sea mucho más sostenible».

Duato y Bolón, que entrelazan su investigación en torno a los algoritmos verdes, coinciden en esa búsqueda de mayor eficacia en los métodos de aprendizaje, una centrada en la selección de las características y otro en los modelos matemáticos para redes neuronales profundas.

Sus vidas se cruzaron cuando Bolón ingresó en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España en 2022 para compartir mesa con Duato. La complementariedad de sus estudios provocó una conexión inmediata que ha abierto el camino a una inminente colaboración de la que, a la vista de la pasión que ambos transmiten por la ciencia, pueden surgir algoritmos más eficientes y explicables.



«La IA no es magia, son algoritmos avanzados aplicados a grandes volúmenes de datos»

**Verónica Bolón**

**«LA CLAVE NO ESTÁ EN  
FRENAR LA IA, SINO EN  
BUSCAR SOLUCIONES  
MÁS EFICIENTES»**

**Verónica Bolón**

**«DESDE EL INICIO DE  
MI CARRERA SUPE QUE  
LA INVESTIGACIÓN  
DEBÍA SER ÚTIL A LA  
SOCIEDAD»**

**José Duato**

## Una transferencia veloz.

---

Mientras los reguladores tratan de establecer un marco para su uso masivo, la IA es hoy imprescindible para las empresas. Un estudio de Gartner estima que el gasto global en IA generativa aumentará un 74,6% en 2025, hasta los 644.000 millones de dólares. Otra investigación de EY indica que el 84% de las empresas españolas ya utilizan la IA en sus procesos.

«Desde el inicio de mi carrera investigadora supe que la investigación debía ser útil a la sociedad, y para ello había que transferirla a las empresas o desarrollarla en colaboración con ellas», explica Duato, cuyas aportaciones en redes de interconexión y soluciones se han implantado en algunas de las mayores multinacionales del mundo y han dado lugar a una decena de patentes.

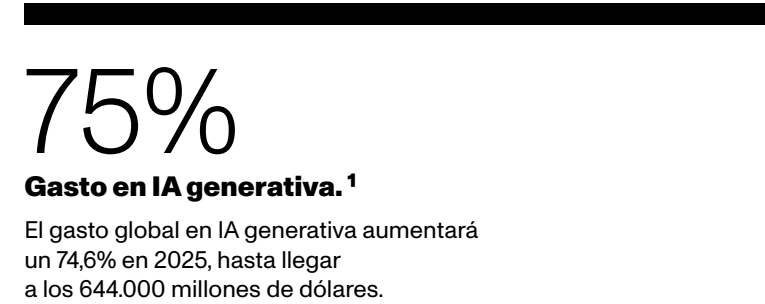
Deseoso de impulsar el desarrollo de tecnología española en el ámbito de la IA, el catedrático de Arquitectura y Tecnología de Computadores en la Universidad Politécnica de Valencia y profesor asociado de la Ohio State University creó una empresa para el desarrollo de nuevos sistemas de IA más sostenibles.

Por su parte, Bolón, cuyos estudios pueden transformar sectores como la industria, la logística o la sanidad, es directora de la Cátedra Inditex-UDC 'IA en Algoritmos Verdes' que su universidad ha creado gracias a una finan-

ciación conjunta del Ministerio de Transformación Digital y Función Pública y el apoyo de la textil gallega para promover «la investigación, la innovación y la transferencia de conocimiento en el campo de la inteligencia artificial y los algoritmos verdes, con el fin de contribuir al desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente».

Además de buscar una mayor eficiencia en el cálculo algorítmico y adoptar métodos más eficientes para dispositivos del Internet de las Cosas, en la Cátedra cuentan con investigadores que trabajan en otras aproximaciones para contribuir al campo de los algoritmos verdes, como el desarrollo de algoritmos de procesamiento de lenguaje natural más eficientes, estructuras de datos compactas, eficiencia energética en edificios, o robótica sostenible, entre otras, explica.

Los dos científicos comparten la visión de que la cuantificación del impacto medioambiental de la IA es clave para diseñar soluciones más sostenibles y justificar decisiones en entornos industriales con un compromiso equilibrado entre racionalidad económica y social.



75%

### Gasto en IA generativa. <sup>1</sup>

El gasto global en IA generativa aumentará un 74,6% en 2025, hasta llegar a los 644.000 millones de dólares.



84%

### Empresas españolas. <sup>2</sup>

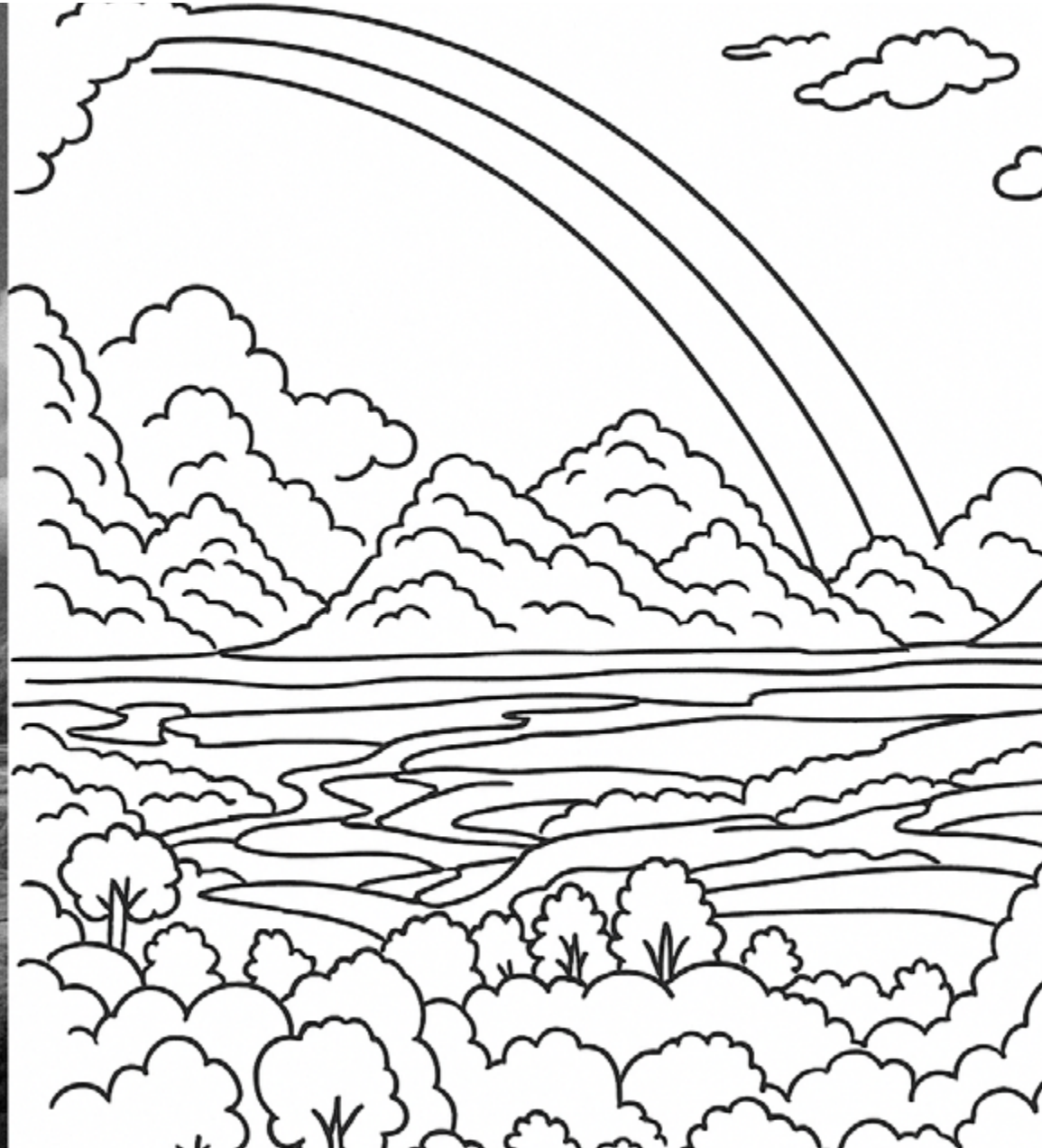
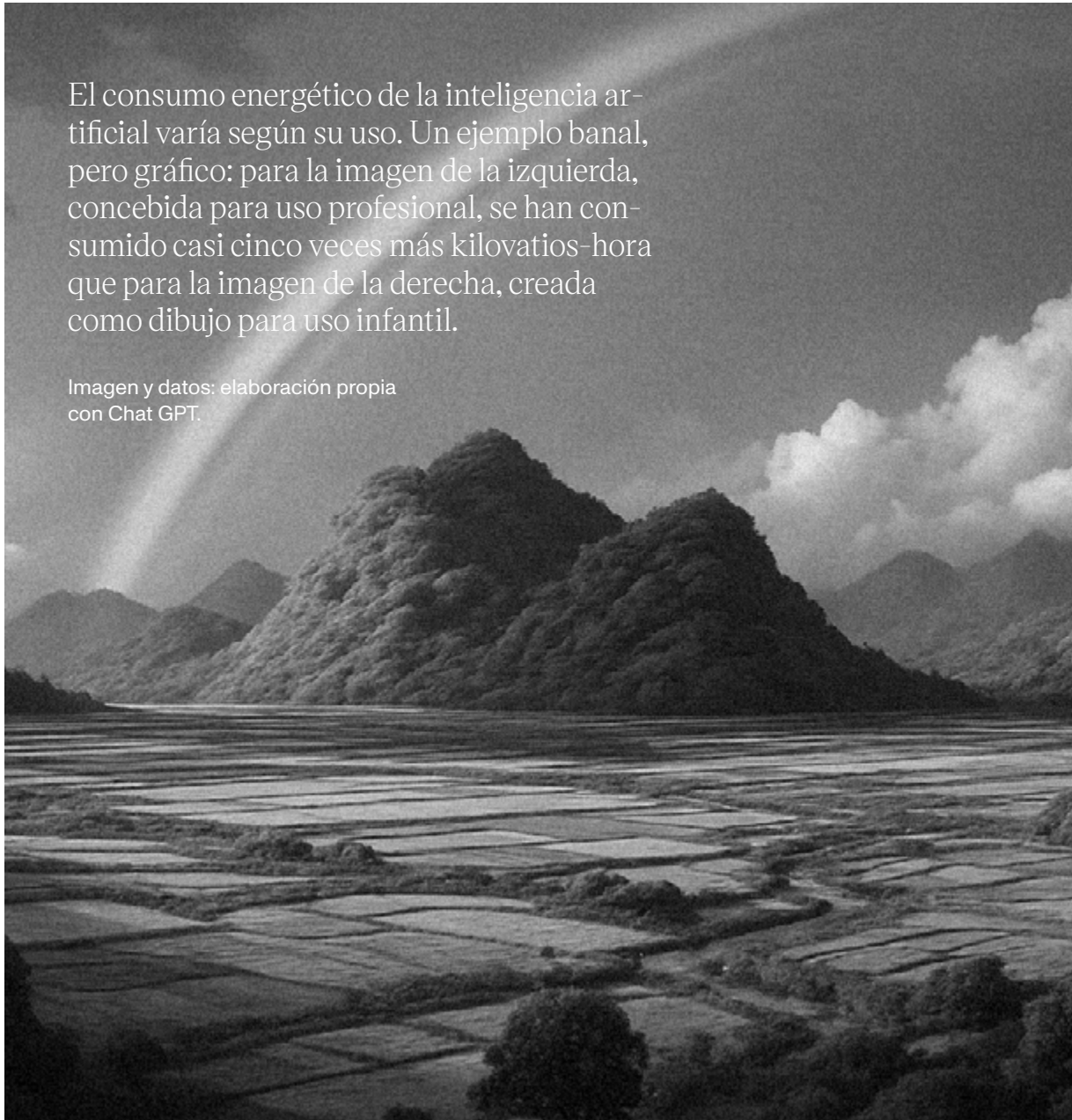
Porcentaje de empresas en España que ya utilizan la IA en sus procesos.

Fuentes:

1. Gartner
2. EY

El consumo energético de la inteligencia artificial varía según su uso. Un ejemplo banal, pero gráfico: para la imagen de la izquierda, concebida para uso profesional, se han consumido casi cinco veces más kilovatios-hora que para la imagen de la derecha, creada como dibujo para uso infantil.

Imagen y datos: elaboración propia con Chat GPT.



## La revolución silenciosa de la computación.

---

Para entender el impacto real de la IA, primero hay que comprender la evolución de la computación. «El desarrollo de la arquitectura de computadores ha sido clave en el avance de la inteligencia artificial», explica Duato. «Sin una base sólida en ‘hardware’, los algoritmos más sofisticados de IA simplemente no funcionarían».

Este aspecto es crucial, ya que muchas veces se pasa por alto el papel que juegan los avances en ‘hardware’ en el desarrollo de la IA y Duato lo sabe muy bien por sus trabajos previos en redes de interconexión que tanto influyen en la eficiencia de los data centers. «El diseño de la interconexión y el movimiento de datos es lo que permite que los dispositivos de cómputo procesen la información de los modelos de IA actuales de manera eficiente y rápida. Sin estos avances, no podríamos alimentar con datos a los dispositivos de cómputo y seguiríamos en la era de los primeros modelos rudimentarios», detalla.

Pero el incuestionable progreso de los modelos de IA podría ser mucho más pronunciado gracias a tecnologías emergentes como la computación cuántica, que promete revolucionar el conocimiento en su sentido más amplio. «Todavía estamos en una fase incipiente, pero en el futuro podría permitir resolver problemas que hoy son intratables para la computación clásica», explica. Sin embargo, advierte

«El reto está en desarrollar modelos de IA más eficientes y sostenibles»

**Verónica Bolón**

que no se trata de una solución mágica: «El desafío es diseñar arquitecturas que realmente aprovechen el potencial de lo cuántico al tiempo que consiguen una elevada eficiencia energética».

Por mucho que la IA se haya convertido ya en un elemento casi ordinario de nuestras vidas, ¿realmente entendemos su impacto? «La inteligencia artificial no es magia, son algoritmos avanzados aplicados a grandes volúmenes de datos», aclara Bolón, especialista en la selección de características del aprendizaje automático aplicada a disciplinas tan esenciales como la medicina. «Pero el verdadero reto no está en desarrollar modelos más complejos, sino en hacerlos más eficientes y sostenibles».

En su empeño por reducir el impacto ambiental de unos algoritmos, Bolón advierte: «Cada vez que entrenamos un modelo de IA de gran escala, el consumo energético es equivalente al de cientos de hogares durante meses. No podemos permitirnos ignorar el coste medioambiental de la tecnología».

Ahora bien, esta advertencia no pretende cuestionar el valor estructural de los centros de datos, que se han convertido en una infraestructura crítica para el desarrollo económico, científico y social. Bolón insiste en que la clave no está en frenar su despliegue, sino en impulsar soluciones más eficientes que hagan viable su crecimiento sin comprometer los objetivos de sostenibilidad. La buena noticia es que muchas de estas infraestructuras ya se están diseñando con criterios de eficiencia energética, integración renovable y economía circular.

En un mundo cada vez más preocupado por la crisis climática, «necesitamos replantearnos cómo diseñamos los algoritmos y buscar alternativas más eficientes. A menudo, modelos más simples y especializados pueden ofrecer resultados igual de buenos con un coste computacional mucho menor», subraya.

Duato coincide en que la optimización es clave. «No se trata solo de crear modelos potentes, sino de hacer que sean prácticos y accesibles. La IA debe integrarse en dispositivos cotidianos sin generar un impacto desproporcionado en el consumo energético», argumenta.

«La IA ya está ayudando en el diagnóstico precoz de enfermedades evitando el despilfarro de recursos computacionales»

**Verónica Bolón**

Lejos de los debates teóricos, tanto Duato como Bolón han trabajado en aplicaciones concretas que demuestran el potencial real de la IA. «En el ámbito de la medicina, la IA ya está ayudando en el diagnóstico precoz de enfermedades como la retinopatía del prematuro o la apnea del sueño», comenta Bolón. «Pero lo más interesante es que estas aplicaciones están siendo desarrolladas con un enfoque de accesibilidad y eficiencia, evitando el despilfarro de recursos computacionales».

Por su parte, Duato enfatiza la importancia de la optimización en los sistemas de computación. «Los grandes avances en IA requieren que el ‘hardware’ sea capaz de soportar cargas de trabajo intensivas sin desperdiciar recursos», explica. «Desde la optimización de servidores hasta el diseño de arquitecturas paralelas, hay una carrera constante por mejorar la eficiencia energética de los centros de datos».

Por mucho que llevemos años hablando de las tecnologías de aprendizaje automático, su vertiginosa y extensa implantación ha sobrepasado las previsiones de muchos y ha generado brechas importantes de conocimiento o, incluso de ética para un mundo que, nos guste o no, será inevitablemente distinto.

«Existe una brecha creciente entre la formación que se ofrece y las necesidades del mercado», advierte Duato. «Los sistemas educativos deben evolucionar para preparar a las nuevas generaciones en habilidades que complementen la IA en lugar de ser reemplazadas por ella».

Bolón coincide y añade: «La IA puede ser una herramienta increíblemente poderosa si se usa con criterio. El problema es que muchas veces se implementa sin una reflexión profunda sobre sus implicaciones sociales y éticas».

En este sentido, ambos abogan por una visión más crítica y matizada de la IA. «No se trata de demonizar la tecnología ni de abrazarla sin reservas», concluye Duato. «Debemos asegurarnos de que su desarrollo sea sostenible, equitativo y realmente beneficioso para la sociedad».

Más allá del ‘hype’ y las predicciones catastrofistas, mientras

el mundo digiere infinitos discursos sobre los riesgos y las maravillas de la inteligencia artificial, en la trastienda de la ciencia nuestros dos protagonistas trabajan silenciosamente para que esta revolución sea lo mejor posible. Y gracias a su confluencia el futuro de la IA no solo promete ser más inteligente, sino también más responsable.

«Hay una carrera constante por mejorar la eficiencia energética de los centros de datos»

**José Duato**

**PRÓLOGO**

**MUY HUMANOS**

**BLOQUE I**

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

**BLOQUE II**

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

**BLOQUE III**

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

**AYER Y MAÑANA**

**EPÍLOGO**

# CIBERSEGURIDAD Y CRIPTOGRAFÍA

Descifrar el riesgo

Cifras y letras que nos protegen.

Consuelo Martínez y David Ríos.





**Consuelo Martínez**



**David Ríos**

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### **BLOQUE II**

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### **BLOQUE III**

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### **AYER Y MAÑANA**

## **EPÍLOGO**

# Consuelo Martínez

## **Ferrol, 1955**

### **Ingreso en la RAC: 24 de noviembre de 2021**

Consuelo Martínez es una destacada matemática española, doctora en Matemáticas por la Universidad de Zaragoza y catedrática de Álgebra en la Universidad de Oviedo. Ha realizado estancias de investigación en instituciones de renombre como las universidades de Yale, San Diego y el KIAS de Corea del Sur.

Su investigación se centra en las álgebras y superálgebras no asociativas, explorando sus interrelaciones con la teoría de grupos y sus aplicaciones en criptografía y teoría de códigos correctores de errores. Ha colaborado estrechamente con el medallista Fields Efim Zelmanov, con quien ha abordado problemas fundamentales en álgebra y teoría de grupos. Martínez ha sido investigadora principal en numerosos proyectos de I+D+i y ha publicado más de ciento treinta artículos en revistas científicas.

Su labor ha sido reconocida con la Medalla de la Real Sociedad Matemática Española en 2018 y el Premio Julio Peláez a Mujeres Pioneras de las Ciencias Físicas, Químicas y Matemáticas en 2018. Es miembro correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España y académica de número de la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería.

### **Saber más**

Personal y transferible.

### **En qué piensa cuando piensa en Ferrol.**

Para mí, Ferrol está ligado a mi infancia y a los veranos en familia. Siempre que pienso en Ferrol, evoco el mar y la playa.

### **Una obra de arte.**

La catedral de León. ¿Cómo pudieron hacer algo tan hermoso y duradero sin los medios técnicos actuales?

### **Una heroína matemática.**

Emmy Noether.

### **¿Dónde encuentra la inspiración?**

Trabajando, en una charla con colegas, durante una conferencia en un congreso... Creo que lo habitual es que nosotros busquemos la inspiración, no que nos busque ella.

### **El álgebra, una definición.**

Para mí, el álgebra es la parte más bella de las matemáticas, representa el orden, el encaje perfecto de las piezas, la búsqueda de patrones, la posibilidad de encontrar conexiones imprevistas, la sublimación del

pensamiento abstracto. Para mí es lo que más se aproxima a la perfección.

### **Un viaje pendiente.**

Costa Rica.

### **Un logro de su carrera profesional.**

Colaborar con una mente tan brillante como la de Efim Zelmanov.

### **Un sueño para el INCIBE.**

Que sea cada día más fuerte y centrado en su servicio a los ciudadanos. Su papel será cada vez más trascendente.

### **Un sonido.**

Dos: el mar y el canto de los pájaros al amanecer y al atardecer.

### **Qué le quita la energía.**

Ir a contrarreloj, teniendo que hacer, deprisa, un montón de cosas, la mayoría trabajo basura.

### **Qué se la da.**

Resolver un problema o ayudar a un alumno o a un compañero.

### **Un lugar en el que se siente segura.**

Mi casa.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# David Ríos

**Madrid, 21 de junio de 1964**

**Ingreso en la RAC: 27 de febrero de 2008**

David Ríos es doctor en Ciencias de la Computación por la University of Leeds y profesor de investigación en Análisis de Riesgos y Ciencia de Datos en el Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT-CSIC). Fue titular de la Cátedra AXA-ICMAT en Riesgos Adversarios (2014–2024). Se licenció en Matemáticas en la UCM con Premio Extraordinario y Nacional (1987).

Ha sido profesor o investigador en las universidades de Manchester, Leeds, Purdue, Duke, Aalto, Paris-Dauphine o Shanghái. Su investigación se centra en la inferencia bayesiana, análisis de decisiones, aprendizaje automático y análisis de riesgos, con aplicaciones en seguridad, ciberseguridad y robótica social.

Ha publicado más de ciento sesenta artículos científicos y dieciocho libros o monografías, ha dirigido veintisiete tesis doctorales y más de cien trabajos de máster y fin de carrera. Investigador principal en más de sesenta proyectos nacionales e internacionales, también ha recibido premios como el Ramiro Melendreras, el Peccei o el DeGroot.

Es miembro de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España y ha sido director científico de Aisoy Robotics.

## Saber más

Personal y transferible.

### Un rincón de Madrid.

La Barranca (Sierra de Guadarrama) en días con poca gente.

### Lo primero que se le viene a la mente cuando piensa en un robot.

Fiel y útil asistente, divertido compañero.

### Un sabor.

Curry rojo thai.

### Algo que le quite el sueño.

La edad, me voy haciendo mayor.

### El mayor logro de su carrera.

Lo mejor está aún por llegar... De lo pasado, socialmente, haber dirigido la tesis a más de treinta investigadores que se han desarrollado muy bien en la academia, la empresa y la política; técnicamente, el haber desarrollado el primer esquema general de análisis de sensibilidad en análisis de decisiones.

### Un lugar donde relajarse.

Las playas de Valdoviño (Villarrube, Frouxeira, Pantín,...) para surfear.

### En una palabra, lo mejor de la IA.

Asombrosa.

### Algo que le haga sentirse seguro.

Un abrazo de mis hijas.

### Una máxima.

‘Work hard, play hard’.

### Un paisaje de su infancia.

La Maliciosa, en la Sierra de Guadarrama.

### Su número favorito.

13.

### En qué piensa cuando no piensa en su trabajo.

En ayudar a mi familia.

### Un miedo.

Los perros, cada vez me producen más pavor.

### Persona que más le inspira.

Thomas Bayes.

### ¿Qué está leyendo ahora?

‘La península de las casas vacías’, de David Uclés.

### Un aroma.

Valdoviño de noche, con viento ‘offshore’.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Algoritmo y adversario: las matemáticas en la nueva seguridad.

## Álgebra y estadística frente a ciberataques.

En el siglo XXI, la línea de defensa ya no la marcan muros ni ejércitos visibles, sino algoritmos. En el complejo entorno geopolítico la inteligencia artificial, la manipulación de datos y las redes globales han desplazado al adversario al territorio de lo intangible. En ese nuevo tablero, la ciencia matemática ha pasado de ser una disciplina abstracta a convertirse en herramienta crítica para anticipar, proteger y neutralizar riesgos.

Dos voces destacadas del ámbito científico español, Consuelo Martínez López y David Ríos lo tienen claro: las ecuaciones son hoy una forma de soberanía. Desde la codificación algebraica hasta el análisis de amenazas inteligentes, su trabajo ilumina un terreno donde las decisiones no pueden dejarse al azar.

«Desde el cuchillo, que permite alimentarnos, pero también matar, hasta la inteligencia artificial, que puede ayudar a descubrir medicamentos o a desarrollar armas bioquímicas, todos los avances tecnológicos han tenido un

uso dual», afirma David Ríos, profesor de investigación en ICMAT-CSIC, numerario de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España y pionero en el análisis de riesgos adversarios.

«Las matemáticas nos ayudan a pensar mejor el proceso de toma de decisiones»

**David Ríos**

Esa ambivalencia, propia de cada salto tecnológico, es ahora más evidente. La digitalización masiva, el aprendizaje automático y la hiperconectividad han generado oportunidades... y también amenazas. «La IA permite desarrollar tecnologías revolucionarias como vehículos autónomos, pero también son ‘hackeables’ para crear nuevos tipos de armamento», alerta Ríos.

Para Consuelo Martínez, una de las grandes referencias internacionales en álgebra, el debate no es tecnológico, sino ético y educativo. «Las matemáticas tienen esa doble naturaleza: pueden ser herramientas de construcción o de destrucción», resume.

Las matemáticas, lejos de ser un lujo teórico, son un instrumento vital para gestionar la incertidumbre. «Nos ayudan a pensar mejor sobre los problemas de toma de decisiones: a estructurarlos, cuantificar la incertidumbre, integrar fuentes de información y mitigar sesgos. Todo eso aumenta la pro-

babilidad de obtener mejores resultados», sostiene Ríos.

Su especialidad, el análisis de riesgos adversarios, aplica herramientas estadísticas y de teoría de juegos para anticipar el comportamiento de amenazas inteligentes. «En defensa, lucha antiterrorista o ciberseguridad, no basta con medir riesgos. Hay que modelizar al adversario», subraya Ríos, para quien los principales riesgos de nuestra era se centran en los conflictos armados, los sucesos extremos debidos al cambio climático, la desinformación y la información falsa, la polarización social y los riesgos asociados a la IA.

Y los resultados de sus estudios son tangibles y variopintos. «Ayudar a mejorar la gestión de incidentes de seguridad aérea en nuestro país supuso ahorros de 800 millones de euros anuales en costes equivalentes de seguridad, casi el presupuesto del CSIC», revela.

En un campo diametralmente distinto, pero con conexiones importantes en otras aplicaciones, Ríos y su equipo han trabajado en un ambicioso proyecto de «robots sociales emocionales» que ayudaron a varios niños con autismo a aprender a hablar.

La última frontera de la digitalización parece ser la autonomía algorítmica.

Pero en base a esas emociones robóticas que parecen sacadas de un relato de Philip K. Dick y ‘¿Deben los sistemas basados en IA tomar decisiones críticas?’.

«Muchos sistemas basados en IA son mejores que nosotros en muchas tareas para las que están diseñadas por lo que no tendría sentido prohibirlos; sin embargo, en ese pro-

ceso debemos regular que en esas actividades se respeten derechos y principios fundamentales básicos», explica Ríos.

«Respecto a los robots sociales emocionales, nuestra hipótesis es que crean mejores vínculos con los usuarios, lo que puede resolver problemas como la soledad de personas mayores, el apoyo a personas con autismo y sus familias, la reconexión con el sistema educativo. Cierto es que existe un potencial de confundir al usuario y engancharlo emocionalmente, pero es cuestión de introducir una regulación adecuada».

¿Y la neutralidad? ¿Puede una IA ser verdaderamente imparcial? Ríos responde con una pregunta: ¿Es neutral nuestra Constitución? ¿Nuestra legislación penal o fiscal? A lo sumo, podemos hablar de compatibilidad con los valores de la mayoría vigente. Pero eso ya es « un terreno para los filósofos del derecho».

Lo que sí tiene claro es que legislar no es frenar la innovación. Al contrario: «Debe verse como una oportunidad para innovar de forma más ética, más robusta y sostenible».

«La inteligencia artificial debe verse como una oportunidad para innovar de forma más ética»

**David Ríos**

# 800

**Millones de euros anuales.**

Este fue el ahorro en costes que supuso mejorar la gestión de la seguridad aérea gracias al análisis de riesgos.

---

**«LAS MATEMÁTICAS  
NOS OBLIGAN A  
PENSAR, A DUDAR Y  
A VERIFICAR»»**

**Consuelo Martínez**

**«EN DEFENSA, NO  
BASTA CON MEDIR  
RIESGOS. HAY QUE  
MODELIZAR AL  
ADVERSARIO»»**

**David Ríos**

Las matemáticas que no se ven (pero nos protegen).

---

Si Ríos trabaja en la superficie del conflicto, Martínez se adentra en los cimientos invisibles que lo sustentan. Desde su cátedra de Álgebra en la Universidad de Oviedo ha investigado estructuras complejas — superálgebras, sistemas raíz, álgebras de Jordan— que parecen alejadas de la realidad, pero son el corazón de la codificación y la criptografía.

«El álgebra moderna es la base de muchos sistemas de cifrado; sin ella, la ciberseguridad no existiría», asegura. Sus trabajos han tenido aplicaciones concretas en seguridad digital, pero también en biología computacional, bases de datos y comunicación segura.

La conexión entre la teoría pura y el mundo real es, para ella, cada vez más directa. «Muchos descubrimientos algebraicos de hace décadas están encontrando ahora aplicaciones insospechadas», reflexiona. «Gracias a estructuras algebraicas se diseñaron esquemas criptográficos que han sido muy útiles y han permitido una nueva era en las comunicaciones», señala Martínez López mientras defiende la investigación básica.

«Yo creo que todos los que nos dedicamos a investigación básica tenemos como objetivo aumentar el conocimiento en nuestro campo, conocer más sobre el comportamiento de objetos (estructuras matemáticas, compuestos químicos o

---

«El álgebra ha permitido una nueva era en las comunicaciones»

**Consuelo Martínez**

el funcionamiento de un órgano de un ser vivo) o descubrir objetos o propiedades nuevas. Cuando Galois en 1832 construyó los cuerpos finitos, la comunidad matemática no le dio ningún valor. Los científicos sólo necesitaban trabajar con cuerpos infinitos, números racionales, reales o complejos y los cuerpos finitos sólo podían interesar a los algebristas, a los que les gusta estudiar temas que no tienen ninguna aplicación, decían algunos (...) pero es imposible imaginar el desarrollo de los ordenadores, operar y comunicarnos con ellos, y el auge de la comunicación y los esquemas criptográficos actuales sin los cuerpos finitos».

«Cada avance tecnológico genera oportunidades y riesgos, fundamentalmente dependiendo del uso que se haga de dichos avances. Pero en los últimos años los avances se producen a tal velocidad que cada vez es más difícil familiarizarse con los medios necesarios para protegerse de riesgos que incluyen problemas derivados del mal uso de los nuevos medios tecnológicos por desconocimiento», explica la experta en álgebra. «No hay grandes diferencias con lo que ocurría en años anteriores. La gran diferencia está en la velocidad a la que se avanza, haciendo que, en un tiempo muy corto, métodos y tecnologías se vean sobrepasadas por otras y resulten obsoletas (...) es difícil para los ciudadanos seguir ese avance imparable y frenético en ocasiones».

En este vertiginoso progreso no todos los riesgos provienen de esa bestia negra conocida como 'malware'. En este mundo en el que compartimos datos personales sin pensar, la manipulación informativa, la suplantación o la desinfor-

mación son uno de los principales riesgos globales según el Foro Económico Mundial.

«A través de la geolocalización de muchas apps, podemos descubrir información privada como dónde vivimos, trabajamos, nuestra religión, hábitos de consumo o si tenemos hijos», explica Ríos. Pero el verdadero peligro, añade, es cómo se puede explotar esa información: «De los textos que publicamos se extraen nuestros rasgos de personalidad. Se pueden diseñar mensajes a medida con fines comerciales... o políticos».

«Es imposible imaginar el desarrollo de los ordenadores sin los cuerpos finitos»

**Consuelo Martínez**

La irrupción de modelos generativos y sistemas como los LLMs (modelos de inteligencia artificial diseñados para comprender y generar lenguaje natural, utilizando técnicas de aprendizaje profundo y grandes cantidades de datos textuales) ha disparado las alarmas. «Estamos muy retrasados en la misión de securizar y robustecer el aprendizaje automático. Apenas hemos empezado a proteger modelos estándar», advierte Ríos.

El problema, señala, no es solo técnico. Es estructural. «El de la seguridad del 'machine learning' es un ejemplo más de carrera armamentista. Hay que estudiar los ataques, las

defensas y los ciclos completos de protección y defensa. No nos queda más remedio que ir por delante del atacante».

En este contexto, la capacidad de Europa para establecer sus propios estándares tecnológicos es una prioridad estratégica. «La situación actual nos pone claramente sobre aviso sobre la necesidad de disponer de sistemas propios de seguridad», sostiene Ríos, cuya experiencia ha sido utilizada en la nueva estrategia de I+D en seguridad de la UE.

En esta línea, la Unión Europea tiene en marcha el ambicioso Programa Europa Digital (2021-2027), que contempla una inversión de 1.900 millones de euros para reforzar la capacidad de ciberseguridad y desplegar herramientas e infraestructuras en todo el territorio. Su objetivo: proteger a administraciones públicas, empresas y ciudadanos ante amenazas digitales cada vez más sofisticadas.

Para las empresas la seguridad no solo es una cuestión de costes, sino también de eficiencia operativa. Es por eso que las principales organizaciones industriales están adoptando modelos de cuantificación del riesgo cibernético como herramienta esencial para alinear sus inversiones en seguridad con la continuidad operativa.

Ríos explica que el entorno de control de riesgos pasa necesariamente por una legislación adecuada. «El Acta Europea de Inteligencia Artificial obliga a integrar nuevos ingredientes en el análisis de riesgos. Es una gran oportunidad para innovar de manera más responsable».

Pero las crecientes acciones de las empresas por protegerse van mucho más allá de una cuestión normativa, con

acciones proactivas que buscan mitigar unos riesgos de terceros que han costado miles de millones de dólares a varias corporaciones en los últimos años.

Solo en el ámbito del sector público, que concentra en servicios básicos gran parte de los ataques, la UE reportó un crecimiento notable de los incidentes en 2023 con un coste medio de 300.000 euros por ataque.

Por esto, cada vez más empresas están implementando principios de seguridad desde el diseño («secure by design») para crear entornos más resilientes.

«El Acta Europea de IA es una gran oportunidad para innovar de manera más responsable»

**David Ríos**

La criptografía ya se usaba en la antigüedad. Una de sus primeras manifestaciones se encontró en jeroglíficos tallados en la pared de una tumba del Antiguo Egipto.

Fuente: University of New England.



David Ríos fue director científico de Aisoy Robotics, una compañía que diseña robots sociales capaces de establecer vínculos emocionales con los niños interpretando estímulos y aprendiendo de ellos.

Imagen: Aisoy Robotics.



## Educar para pensar. El escudo más olvidado.

---

Pero Europa también arrastra una debilidad estructural: la distancia entre la investigación académica y la industria tecnológica. «La industria se centra en implementar estándares de ejecución sencilla, que no siempre sirven en contextos críticos. Y la academia, muchas veces, no tiene interés en desarrollar soluciones industriales. Entre ambos surge un nicho enorme para soluciones más seguras y mejor fundadas», señala el experto en metodologías de análisis de riesgo para inteligencia geopolítica.

Más allá de la tecnología, ambos científicos reivindican una dimensión olvidada: la educación matemática como defensa cultural.

Para Ríos, aprender matemáticas es aprender a decidir. Para Martínez, saber matemáticas es una cuestión de libertad intelectual: «Las matemáticas también nos enseñan a no conformarnos con respuestas únicas. Nos obligan a pensar, a dudar y a verificar. Y eso es esencial en una sociedad vulnerable a la desinformación».

En un momento en el que las empresas y los gobiernos invierten miles de millones de euros para proteger sus sistemas, la formación en matemáticas y la colaboración con otras disciplinas científicas parece prioritaria para corregir un déficit de talento que también puede tener consecuencias.

Para Ríos, la inversión en investigación y formación debería de ser, de hecho, una cuestión de Estado. «Y no sólo en lo referido a ciberseguridad y a defensa», sostiene. «Estadísticamente, los países que más progresan, que más avanzan, son los que tienden a invertir más en investigación y formación».

«En el ámbito de la ciberseguridad hay distintos niveles y no todos requieren el mismo nivel de formación matemática», explica Martínez. «Yo creo que es muy importante generar equipos interdisciplinares, que permitan abordar los problemas desde distintos ángulos».

En una era saturada de ruido, donde las emociones se agitan en tiempo real y la intuición puede ser fácilmente manipulada, tomar buenas decisiones exige más que corazonadas. Exige método. Exige ciencia. Álgebra para estructurar, estadística para comprender el azar, teoría de juegos para anticiparse al otro. No se trata de apagar el juicio humano, sino de iluminarlo.

«La clave está en  
aprender a aprender»

**David Ríos**

«Es muy importante generar equipos interdisciplinares que aborden los problemas desde distintos ángulos»

**Consuelo Martínez**

## PRÓLOGO

## MUY HUMANOS

### BLOQUE I

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

### BLOQUE II

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

### BLOQUE III

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

## AYER Y MAÑANA

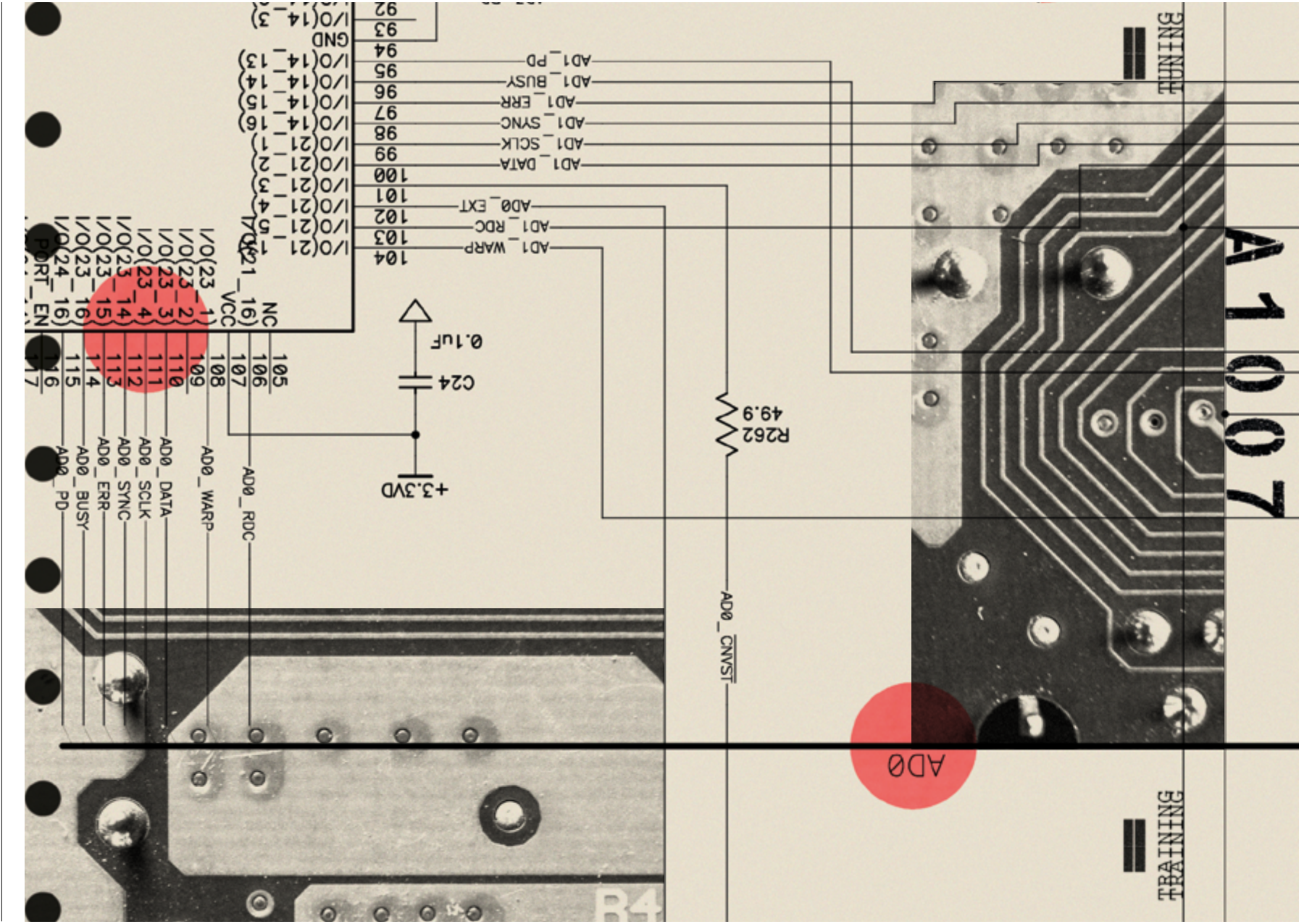
## EPÍLOGO

# OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS

Datos que cuentan

Estadística y optimización de procesos para manejar la incertidumbre.

**Wenceslao González Manteiga y María Ángeles Gil.**





**María Ángeles Gil**



**Wenceslao González Manteiga**

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

**AYER Y MAÑANA**

**EPÍLOGO**

# María Ángeles Gil

## Valladolid, 15 de septiembre de 1953 Ingreso en la RAC: 25 de enero de 2023

María Ángeles Gil es catedrática de Estadística e Investigación Operativa y doctora en Ciencias Matemáticas por la Universidad de Oviedo. Fue la primera mujer doctora y catedrática en Matemáticas por dicha universidad.

Research Associate en la Universidad de California en Berkeley (1988–1990), su trayectoria investigadora se ha centrado en el análisis estadístico de datos imprecisos, con especial énfasis en elementos aleatorios con valores de conjunto 'fuzzy'.

Es fundadora y coordinadora del grupo de investigación SMIRE+CoDiRE, y ha dirigido quince tesis doctorales y numerosos proyectos financiados en convocatorias competitivas.

Cuenta con más de cien publicaciones en revistas indexadas en el JCR, ha editado libros en editoriales como Springer y ha formado parte del comité editorial de varias revistas científicas, siendo co-editora-jefe de una de ellas.

Entre los reconocimientos recibidos destacan la Medalla de Plata del Principado de Asturias (2014), la Medalla SEIO–FBBVA (2021) y su nombramiento como Fellow de la International Fuzzy Systems Association (2015), académica numeraria de la Academia Asturiana de Ciencia e Ingeniería (AACI) y miembro de honor del Real Instituto de Estudios Asturianos (2025).

### **Saber más**

Personal y transferible.

### **Un rincón de Oviedo.**

El patio del Edificio Histórico de la Universidad de Oviedo.

### **Un dato estadístico que le sorprenda.**

Me sorprende la filosofía y el razonamiento tras la metodología estadística.

### **Una certeza.**

El mejor reconocimiento es el cariño.

### **Una cualidad humana.**

La bondad.

### **Mayor reto de su carrera profesional, hasta la fecha.**

Marchar a Berkeley cuando me sentía contenta profesionalmente en Asturias. Me asustaba una vida tan distinta, pero fue una experiencia única y que siempre animo a los estudiantes a vivir.

### **Un/a mentor/a.**

Mi hermano, Pedro Gil.

### **En qué piensa cuando piensa en la docencia.**

En intentar transmitir lo mejor posible aquello que tanto me gusta y en lo que creo. Y en lo que me inculcaron varios profesores.

### **Un número.**

El siete.

### **Una película.**

'Amanece, que no es poco', de José Luis Cuerda.

### **Un sueño para la estadística en España.**

Que se mantengan o, incluso, mejoren las buenas relaciones que promueve la Sociedad de Estadística e Investigación Operativa (SEIO), así como las existentes con investigadores extranjeros de altísimo nivel, y que las carreras de tantos jóvenes investigadores estadísticos sean una realidad.

### **En la vida real, persona que más admira.**

Empezaría por mis padres y hermanos, mis hijas, mis sobrinos y desde luego mi marido. También compañeros y amigos, y personas que tuve la suerte de encontrarme: David Blackwell, Lotfi Zadeh, Javier Girón, Javi Busto....

### **Un paisaje.**

El Pico de la Carba con la Foz del Palanco en Geras de Gordón, León.

### **¿Dulce o salado?**

Dulce. Sin empalagar, pero dulce.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Wenceslao González Manteiga

**São Paulo, 31 de mayo de 1956**

**Ingreso en la RAC: 25 de octubre de 2023**

Wenceslao González Manteiga es catedrático de Estadística en la Universidade de Santiago de Compostela (USC), donde desarrolla su labor académica desde 1979. Doctor en Estadística por la misma universidad, fue uno de los primeros doctores de la disciplina en Galicia y una figura clave en el desarrollo de la estadística no paramétrica, con importantes aportaciones en estimación de densidades, series temporales, datos funcionales y métodos de alta dimensión.

Su enfoque combina la teoría estadística con aplicaciones en biomedicina, medio ambiente e industria, incluyendo colaboraciones estables con empresas como ENDESA o Babcock. Es investigador principal del grupo MODESTYA, reconocido como grupo de referencia por la Xunta de Galicia, y ha dirigido treinta y seis tesis doctorales, consolidando una amplia red de colaboración internacional en Europa y América.

Cuenta con más de doscientos publicaciones científicas, ha sido coeditor-jefe de la revista "TEST" y editor asociado en revistas de referencia internacional. Fue fellow del Institute of Mathematical Statistics y actualmente es miembro de la Real Academia Gallega de Ciencias. También ha recibido distinciones como el Premio Nacional de Estadística (2021) y la Medalla SEIO-Fundación BBVA (2020).

**Saber más**

Personal y transferible.

**São Paulo, en una palabra.**

Es un lugar que está en mi ADN, donde pasé mi infancia.

**Un color.**

Azul de Ciencia, del mar, el color que inspira un futuro feliz.

**¿Dulce o salado?**

Dulce, isoy muy goloso!

**Rincón favorito de Santiago.**

La Alameda, desde donde aprecias la inmensidad de la catedral.

**Lo primero que viene a su mente cuando lee la palabra «matemáticas».**

Pensar si están bien utilizadas o no.

**Una canción.**

‘Garota de Ipanema’ en cualquiera de las mil versiones que he oído.

**Un sonido de su infancia.**

El bullicio de la gente cuando el barco en el que iba con mis padres, partía del puerto de Santos (en Brasil) hacia España. En ese bullicio se mezclaba toda la alegría y tristeza que una persona puede apreciar.

**Un miedo.**

Siempre tuve miedo a los fuegos de

artificio. Pensando en que el azar hiciese que una varilla cayese sobre mi cabeza.

**Persona que inspira sus días.**

Mi esposa. Llevo con ella casi cincuenta años y cada día me sorprende de su ilusión por la vida.

**Un deseo para MODESTYA.**

Que, cuando pasen varios años, mi nombre corresponda al pasado, superado por las aportaciones de las nuevas generaciones de científicos.

**Su remedio antiestrés.**

Pasear por el bosque muy temprano cada día, no hay nada más antiestrés que oír a la naturaleza.

**¿Una máxima?**

¡A quien madruga, Dios le ayuda!

**Una predicción en la que le gustaría acertar.**

Prefiero fallar en mis predicciones pesimistas.

**Un deporte.**

El fútbol, sin duda. Y, si es ‘jogo bonito’, mejor.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# La gestión matemática de la incertidumbre: así se modeliza y trata la estadística.

## El papel de los datos en la era de la IA.

En un mundo saturado de datos, la estadística se ha convertido en una herramienta esencial para entender la realidad. Pero ¿qué ocurre cuando esos datos son imprecisos, complejos o directamente borrosos? ¿Qué papel juegan los estadísticos en la era de la inteligencia artificial? Dos catedráticos de referencia en España, Wenceslao González Manteiga y María Ángeles Gil, conversan sobre el presente y futuro de un elemento indispensable en la toma de decisiones en campos como la inteligencia artificial, la medicina personalizada o la gestión ambiental.

¿Confiarías tu salud a una inteligencia artificial entrenada sin control estadístico? Wenceslao González Manteiga y María Ángeles Gil no lo recomiendan. Para ambos, la estadística no es solo una ciencia exacta, sino un lenguaje sofisticado para lidiar con la incertidumbre. «Los datos son el petróleo actual. Si se tiene información correcta, las decisiones tomadas con procedimientos estadísticos van a ser muy eficientes

en cualquier contexto», asegura González, un matemático con alma de filósofo que, desde la Universidad de Santiago de Compostela, compagina investigación y docencia.

Esta «fiebre del dato» ha convertido a la estadística en el arte —y la ciencia— de extraer valor a millones de registros que, interpretados y validados, pueden convertirse en decisiones estratégicas. Por esto, la estadística está en el centro de la transformación digital. «No recuerdo una época con tanta demanda», afirma Gil, la catedrática de la Universidad de Oviedo que ha modernizado la disciplina con sus estudios sobre los elementos aleatorios con valores difusos.

«La estadística es una de las puertas transversales de las matemáticas con la realidad»

**Wenceslao González Manteiga**

En una familia en la que se habla de matemáticas a menudo (su padre, maestro, era un enamorado de las matemáticas y dos hermanos la precedieron en los estudios relacionados con las matemáticas y la estadística), Gil vislumbra el futuro más claro que ha tenido la profesión en décadas. «En estos años, las empresas y entidades se han percatado de lo que pueden aportar los estadísticos tanto a ellas, como a sus centros de I+D+i. El auge de la IA está impulsando también la contratación de estadísticos».

Pero esta época dorada de la profesión requiere reformular el modo en que se enseña y se aplica la metodología estadística, una ciencia que siempre ha sido transversal. «La estadística es una de las puertas transversales de las matemáticas con la realidad. La mayor parte de los métodos estadísticos nacieron a partir de motivaciones con datos reales», explica González. Desde la supervivencia de enfermos hasta la duración de máquinas industriales, su aplicación es ubicua.

Gil, por su parte, matiza que esta sinergia científica no es nueva: «Desde décadas atrás, ya existía la que podríamos denominar 'Ciencia con Datos', porque la Estadística, gracias al sustento matemático, objetivo y universal que le proporciona la Probabilidad, ha ayudado a dar solución a muchos problemas del mundo real».

Esa aplicación a problemas reales no se queda en la teoría. Wenceslao González Manteiga coordina el grupo MODESTYA (Modelos de Optimización, Decisión, Estadística y Aplicaciones), un referente en estadística, investigación operativa y optimización. Bajo un acrónimo que define a la perfección la primera impresión que uno tiene al conocer al catedrático y principal investigador de la institución, se esconde un grupo de referencia tanto en la investigación y como en la transferencia de la estadística y la optimización de procesos al sector productivo.

«Queremos ser reconocidos no solo por la calidad de nuestras publicaciones, sino también por nuestra capacidad de transferencia de conocimiento al tejido económico y

social», explica sobre la amplia base de proyectos en los que han colaborado con empresas y otras instituciones en sectores que van desde la banca a la gestión de servicios básicos como la energía.

«Hemos trabajado en modelos predictivos de polución en el entorno de una central térmica durante más de 30 años con diversos métodos que hacen uso de una combinación de nuevas ideas estadísticas y desarrollos computacionales. Este sistema generaba alarmas de intervención en la producción de energía en función de los indicadores medioambientales. También hemos desarrollado mecanismos de especificación de modelos de tipos de interés, fundamentales para la creación de productos financieros. Este aspecto es muy importante. Una mala especificación del modelo puede generar importantes crisis financieras con quiebras de bancos».

Lo singular de MODESTYA es su vocación de interconexión con otros campos. «A diferencia de otros grupos, el nuestro es muy transversal y conectado no solo con nuevos avances matemáticos, sino también con Ciencias de la Salud, Biología o Economía», explica González. Esa transversalidad es también una forma de abrir puertas a la transferencia de conocimiento, desde los algoritmos a la toma de decisiones públicas.

«La IA y la estadística no solo deben coexistir, sino colaborar, y mucho»

**María Ángeles Gil**

---

**«LAS EMPRESAS SE  
HAN PERCATADO DE  
LO QUE PUEDEN  
APORTAR LOS  
ESTADÍSTICOS»**

**María Ángeles Gil**

**«LOS DATOS SON  
EL PETRÓLEO ACTUAL»**

**Wenceslao González Manteiga**

## La IA y el riesgo de no entender los algoritmos.

---

Aunque su complementariedad está fuera de duda, la relación entre estadística e inteligencia artificial no es siempre fácil.

«Uno de los textos de referencia en el aprendizaje en las titulaciones actuales de Inteligencia Artificial (IA) es el libro: «Artificial Intelligence: a Modern Approach» de dos autores de referencia en el ámbito como son Russel y Norvig. El libro debe ir por su quinta edición desde su aparición hace dos décadas. Gran parte del contenido metodológico es de Estadística y Probabilidad. ¿Puede haber una relación más clara?», explica González.

«A mi juicio, el mayor riesgo es que los avances en la IA son muy acelerados con procedimientos robóticos que hacen que se pierda el control de lo que hace un algoritmo. Un símil del problema podría ser el de un piloto de avión que maneja muy bien el aparato, pero desconoce todo lo que hay dentro de los mecanismos de funcionamiento del avión. Es decir, sabe aplicar bien las técnicas de la IA, pero no podría intervenir en los algoritmos, dado que muchas veces desconoce la base del diseño de estos».

Gil coincide, aunque ofrece una visión complementaria: «IA y estadística no solo deben coexistir, sino colaborar y mucho. La IA no ha venido a reemplazar a la estadística». Además, destaca que los estadísticos están contribuyendo a que los algoritmos sean «justos e imparciales» y a

reducir sesgos.

Ambos advierten del riesgo de que los usuarios de herramientas estadísticas e inteligentes pierdan el contacto con los fundamentos. «El desconocimiento de los fundamentos probabilísticos de apoyo no exime a los usuarios de tener que verificar los requisitos que deben satisfacer los datos para que la aplicación de cualquier método estadístico sea fiable», recuerda Gil.

Hay numerosos estudios e iniciativas relacionados con la importancia de identificar y corregir sesgos en sistemas de IA. Recientemente, la Universitat Oberta de Catalunya (UOC) desarrolló LangBiTe, una herramienta de código abierto diseñada para detectar prejuicios en desarrollos de IA, evaluando si las respuestas de estas aplicaciones incluyen sesgos políticos, de género o xenófobos.

Un informe del sindicato UGT denunció también en 2025 que la falta de diversidad en los equipos que desarrollan sistemas de IA ha llevado a la perpetuación de estereotipos y discriminación en estas tecnologías. En concreto, explicó que algunas herramientas de IA utilizadas por empresas en España perpetúan roles de género discriminatorios, asociando profesiones de alta cualificación y liderazgo con figuras masculinas, mientras asignan roles inferiores a figuras femeninas.

Otros estudios recientes han demostrado que los sesgos presentes en sistemas de IA pueden incluso transferirse a las personas que interactúan con ellos. Investigadoras de la Universidad de Deusto encontraron que individuos aconsejados

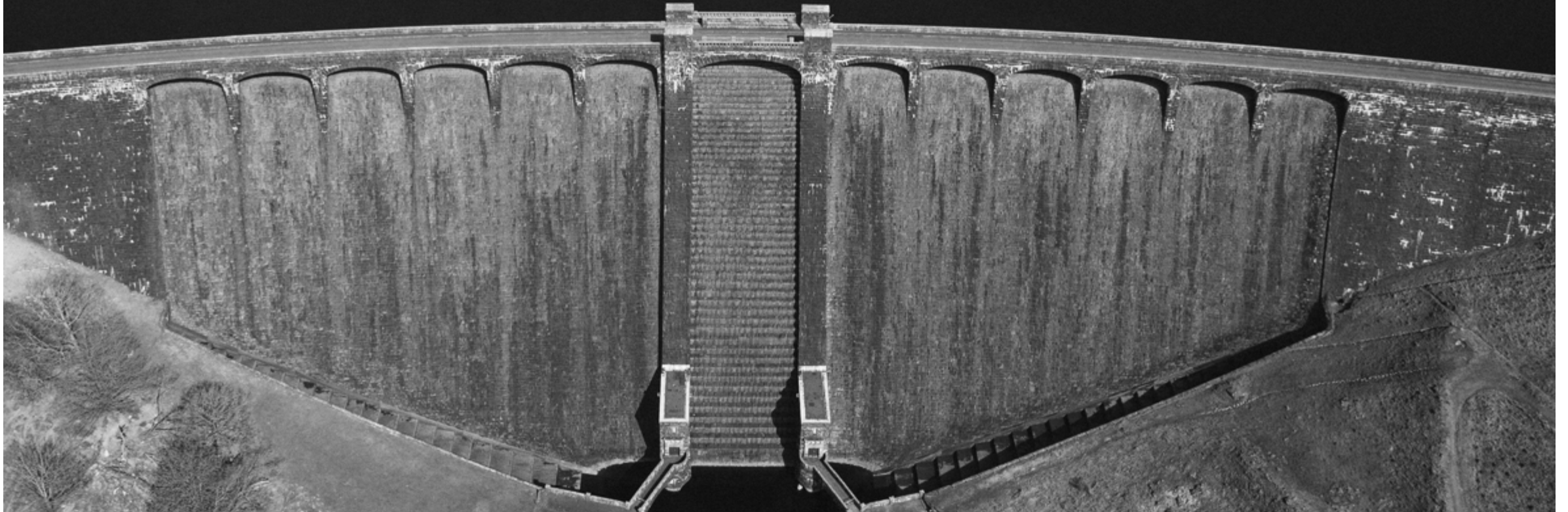
por una IA sesgada tendían a adoptar decisiones alineadas con dichos sesgos, incluso después de dejar de interactuar con la IA.

«Los estadísticos están contribuyendo a que los algoritmos sean justos e imparciales y a reducir sesgos»

**María Ángeles Gil**

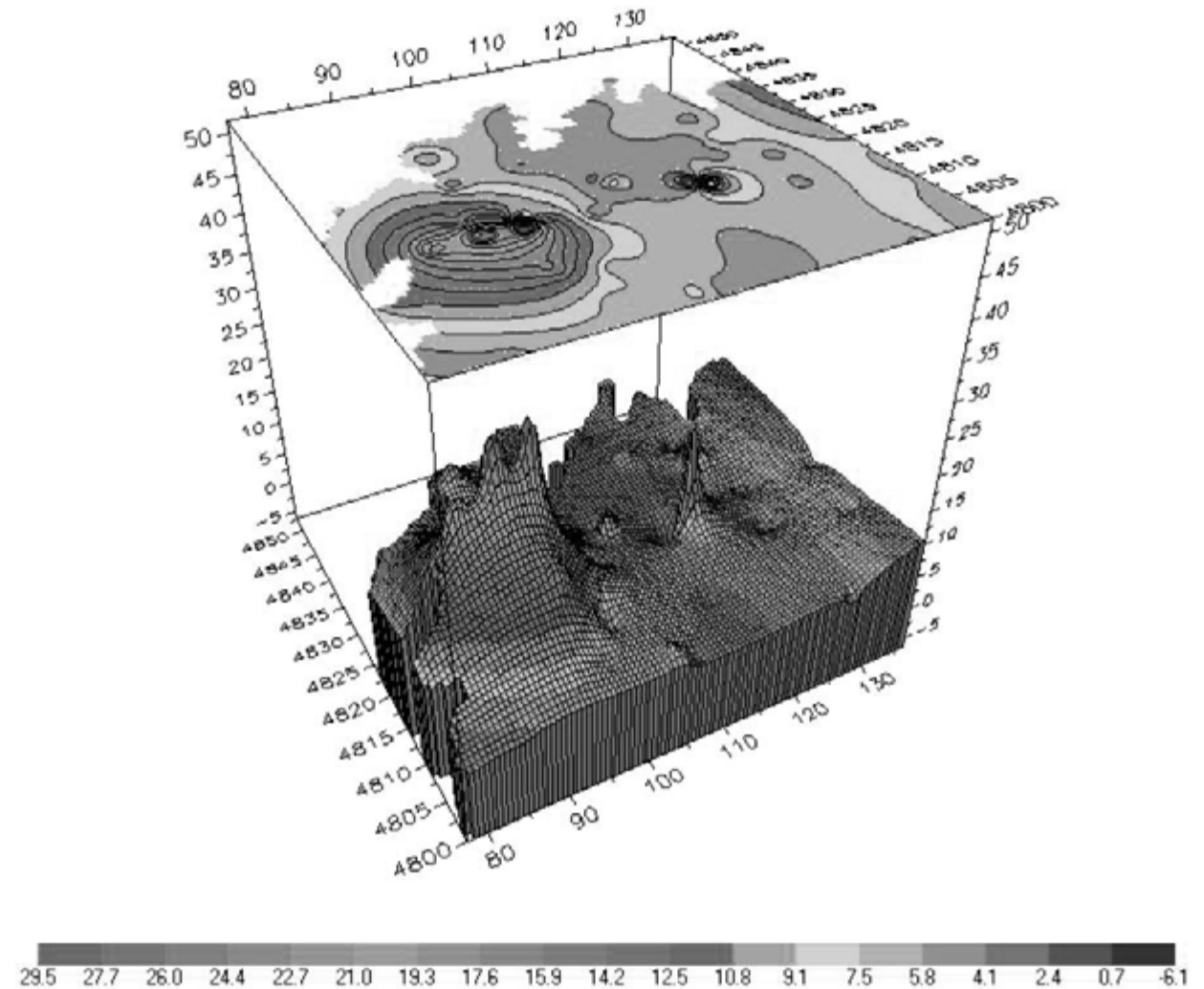
El grupo de investigación de María Ángeles Gil colabora con una empresa valenciana especializada en seguridad de presas para establecer un sistema de gestión de riesgos de inundación y seguridad.

Imagen: Marcus Woodbridge.



Superficie de predicción espacial de niveles de polución en torno a la Central térmica de As Pontes desarrollado por el equipo de Wenceslao González Manteiga.

Imagen: Wenceslao González Manteiga.



Datos para controlar presas o tratar enfermedades.

---

Una de las líneas más fascinantes del trabajo de Gil es el tratamiento de datos 'fuzzy' o difusos, es decir, imprecisos. «Aunque semánticamente la imprecisión puede tener un significado amplio, se entiende por datos imprecisos aquellos que provienen de valoraciones humanas o de magnitudes aleatorias para las que se carece de instrumentos que puedan medirse con exactitud», explica. Su grupo de investigación ha sido pionero en esta metodología, adaptando modelos matemáticos para analizar estos datos de forma rigurosa.

Las aplicaciones son sorprendentes y variadas. Desde cuestionarios con escalas 'fuzzy' aplicados a contextos educativos, sociales o laborales en colaboración con empresas como ArcelorMittal, hasta un reciente contrato con una 'spin-off' de la UPV especializada en seguridad de presas para establecer un sistema de gestión de riesgos de inundación y seguridad. «Recopilan para cada presa valoraciones que pueden modelizarse mediante datos 'fuzzy' y llegar a una 'valoración de consenso' que no ignore la de ningún experto, pero con menor incidencia de las valoraciones discrepantes», explica la estadista.

Detrás de esta óptica hay una filosofía potente: «El enfoque que seguido aborda el análisis de datos 'fuzzy' manejando cada uno de ellos como un todo, es decir, como una valo-

ración única. Y hace posible emplear una escala de medida para las valoraciones humanas más rica y expresiva».

En un momento en que la inteligencia artificial (IA) promete revolucionar la medicina, la estadística se ha convertido también en uno de los pilares silenciosos pero fundamentales de la medicina personalizada, una disciplina que avanza al ritmo del análisis de grandes volúmenes de datos biomédicos.

«La tecnología médica podría dar un tratamiento personalizado al paciente»

**Wenceslao González Manteiga**

Herramientas estadísticas sofisticadas permiten hoy identificar patrones ocultos en el ADN, predecir la evolución de enfermedades crónicas e incluso anticipar dolencias asociadas al envejecimiento a partir de un simple análisis de sangre. Un estudio reciente publicado en 'The Lancet Digital Health' ha demostrado, por ejemplo, que ciertos biomarcadores proteicos permiten estimar la edad funcional de órganos clave y, con ello, anticipar el riesgo de padecer hasta 45 enfermedades distintas. Este tipo de predicciones, imposibles sin modelos estadísticos complejos, abre la puerta a tratamientos más personalizados y preventivos.

Además, el cruce entre estadística, inteligencia artificial y medicina ya está mostrando resultados tangibles. Varias instituciones españolas participan en proyectos que aplica

algoritmos predictivos para detectar enfermedades graves o personalizar tratamientos oncológicos que ilustran cómo el dominio de la inferencia estadística ya no es solo competencia de matemáticos o bioinformáticos, sino una herramienta clínica imprescindible para anticiparse a la enfermedad antes incluso de que se manifieste.

«En la medida en que la tecnología médica permita hacer mediciones en tiempo continuo de parámetros desalud-deunserhumano, se podría dar un tratamiento personalizado al paciente», afirma González.

Aunque advierte de una paradoja: «Otra cuestión ya sería el aspecto psicológico de aguantar la presión informativa en el propio paciente, cuando algún parámetro indicase un riesgo cardiaco, por ejemplo».

---

# 45

## **Enfermedades que pueden prevenirse**

'The Lancet Digital' ha demostrado que ciertos biomarcadores proteicos permiten anticipar el riesgo de padecer hasta 45 enfermedades distintas.

## Conciencia estadística.

---

Ambos entrevistados coinciden en la importancia de una formación matemática y computacional sólida. «Con esta formación, de entrada, el buen sueldo está garantizado», asegura González. Gil, más filosófica, concluye: «Las conclusiones y decisiones estadísticas no son categóricas, sino relativas. Gracias a la intervención de la probabilidad que «ha sido y seguirá siendo crucial para el desarrollo de la estadística, puede medirse y controlarse de alguna forma el grado de certeza de las mismas».

No es solo una cuestión de empleo, sino de cultura científica. Para Gil, «la debilidad de la estadística reside en la imposibilidad de proporcionar conclusiones inequívocamente ciertas debido a la incertidumbre intrínseca solo se dispone de los datos). Pero su grandeza deriva a su vez de su capacidad de gestionar de forma objetiva y universal tal incertidumbre».

Esa conciencia es clave en una era en la que los datos no solo describen la realidad, sino que contribuyen a moldearla.

En una época dominada por datos masivos, algoritmos opacos y decisiones automáticas, la estadística se revela como una ciencia silenciosa pero imprescindible. Y sus practicantes, como los protagonistas de este reportaje, como garantes de que incluso lo impreciso pueda analizarse con precisión.



«La fortaleza de la estadística reside en su capacidad para gestionar la incertidumbre intrínseca a los datos de manera objetiva y universal»

**María Ángeles Gil**

**PRÓLOGO**

**MUY  
HUMANOS**

**BLOQUE I**

Inteligencia  
artificial

Ciberseguridad  
y criptografía

Optimización  
de procesos

**BLOQUE II**

Computación  
e información  
cuánticas

Nanociencia

Visión del  
cosmos

Energía  
sostenible

**BLOQUE III**

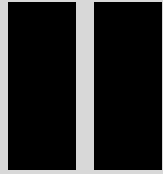
Sostenibilidad  
y biodiversidad

Cambio  
climático

Neurociencia  
y cerebro

**AYER Y  
MAÑANA**

**EPÍLOGO**



**Bloque II**

# DE UN GRANO DE ARENA AL CIELO

Leyes físicas y reacciones químicas  
que rigen nuestros días.



**PRÓLOGO**

**MUY HUMANOS**

**BLOQUE I**

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

**BLOQUE II**

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

**BLOQUE III**

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

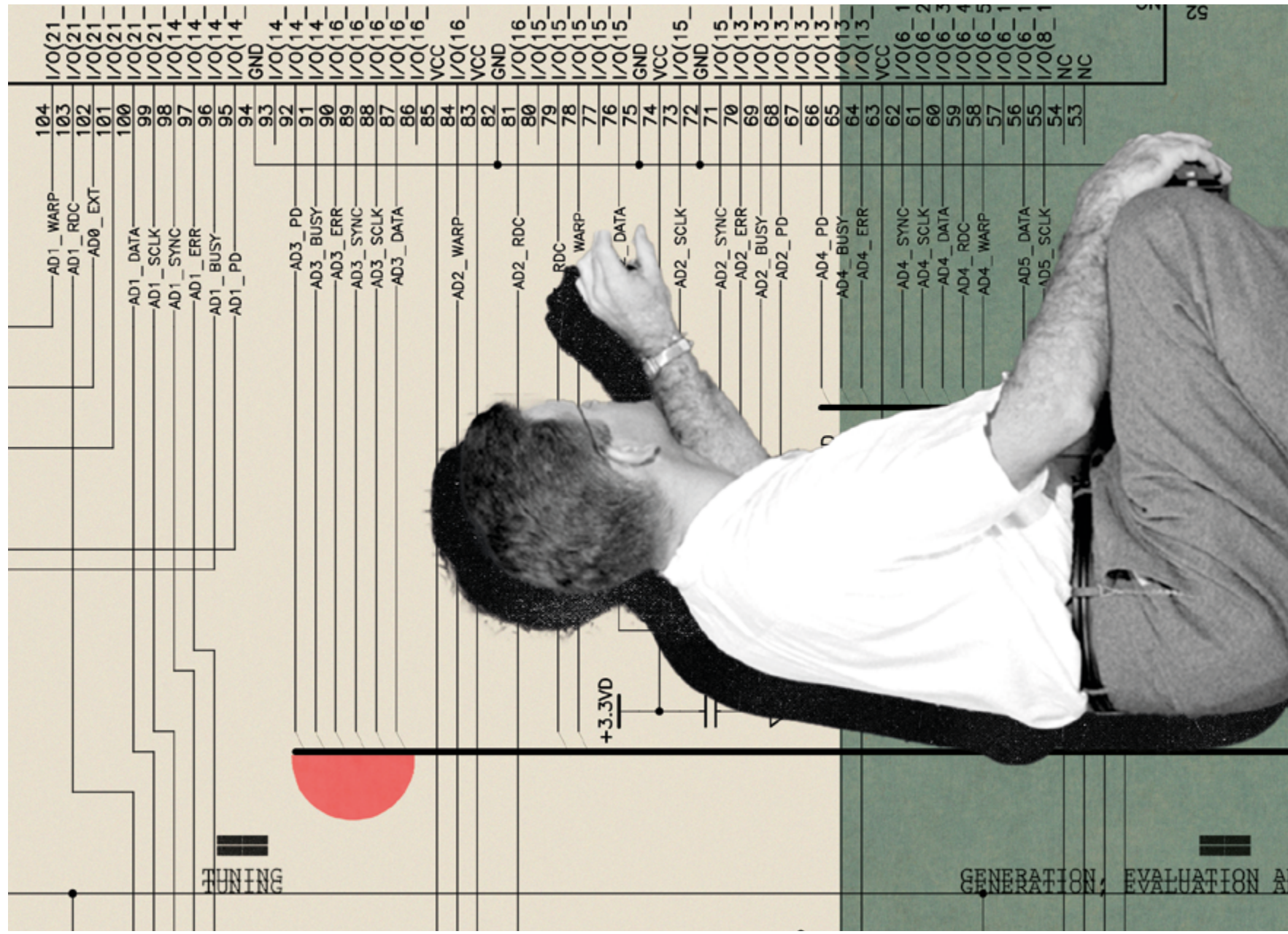
**AYER Y MAÑANA**

**EPÍLOGO**

# COMPUTACIÓN E INFORMACIÓN CUÁNTICAS

El tiempo y lo posible

El camino hacia una computación cuántica cotidiana. **Ignacio Cirac y David Pérez García.**





**Ignacio Cirac**



**David Pérez García**

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### **BLOQUE II**

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### **BLOQUE III**

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### **AYER Y MAÑANA**

## **EPÍLOGO**

# Ignacio Cirac

**Manresa, 11 de octubre de 1965**

**Ingreso en la RAC: 25 de mayo de 2016**

Ignacio Cirac es doctor en Física por la Universidad Complutense de Madrid.

Reconocido internacionalmente por sus contribuciones pioneras en computación cuántica, óptica cuántica y física de sistemas cuánticos de muchos cuerpos, Cirac ha desarrollado su carrera en instituciones de prestigio como la Universidad de Innsbruck. Dirige la División Teórica del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica en Garching y es profesor honorario de la Universidad Técnica de Múnich.

Cirac ha sido clave en el desarrollo teórico de los ordenadores cuánticos, proponiendo junto a Peter Zoller modelos que demostraron la viabilidad de su construcción experimental. Sus investigaciones han abierto nuevas vías en la simulación y la criptografía cuánticas, con aplicaciones potenciales en áreas como la comunicación y los nuevos materiales.

Entre sus reconocimientos, el Premio Príncipe de Asturias de Investigación Científica y Técnica (2006), el Premio Fundación BBVA Fronteras del Conocimiento (2008) y el Premio Wolf en Física (2013). Es miembro de la Sociedad Max Planck, la Leopoldina, la Academia Austriaca de Ciencias y la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España.

**Saber más**

Personal y transferible.

**Un paisaje de Alemania.**

Los Alpes.

**Un sabor de su infancia.**

Regaliz.

**Un recuerdo de Manresa.**

El río Cardener.

**El mayor logro de su carrera, hasta la fecha.**

Los científicos que se han formado conmigo.

**Un reto.**

Encontrar nuevas aplicaciones de la física cuántica.

**Un problema a resolver.**

Cuantizar la gravedad.

**¿Número favorito?**

Pi.

**Un sueño para la cuántica.**

Que nos ayude.

**Un/a colega a quien admire.**

Albert Einstein.

**En una palabra, lo mejor de la computación cuántica.**

Esperanza.

**Una canción.**

‘Where is my mind’, de Pixies.

**Qué le quita la energía.**

El panorama político.

**Qué se la da.**

Mi familia.

**Una verdad científica que considere importante.**

No digas nunca jamás.

**Persona que inspira sus días.**

Mi familia.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# David Pérez García

**Guadalajara, 14 de octubre de 1977**

**Ingreso en la RAC: 8 de marzo de 2023**

David Pérez García es doctor en Ciencias Matemáticas por la Universidad Complutense de Madrid (UCM), catedrático de Análisis Matemático en la misma institución y miembro del Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT), donde codirige el Laboratorio Ignacio Cirac.

Su investigación se centra en la intersección entre matemáticas e información cuántica, destacando por introducir técnicas innovadoras en áreas como la física de la materia, la teoría de la complejidad y la computación cuántica. En 2005 realizó una estancia postdoctoral en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica, donde inició su trabajo en tecnologías cuánticas. A su regreso, fundó el grupo de investigación Matemáticas e Información Cuántica en la UCM.

Autor de más de cien publicaciones en revistas de alto impacto, ha dirigido nueve tesis doctorales y supervisado a trece investigadores postdoctorales.

Entre sus distinciones, la Medalla Ramón y Cajal de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España (2021), el Premio Fundación Banco Sabadell a las Ciencias e Ingeniería (2019), el Premio Real Academia de Ciencias-Endesa (2013) y el nombramiento como John von Neumann Guest Professor en la Universidad Técnica de Múnich (2014).

**Saber más**

Personal y transferible.

**Un lugar donde se concentre para escribir sus artículos.**

En cualquier sitio.

**Una verdad científica que considere importante.**

Matemática no hay más que una.

**Pasatiempos favorito.**

Jugar a juegos de mesa con mi familia.

**Un rincón de Guadalajara.**

El Palacio del Infantado.

**¿Y de Munich?**

Olympiapark.

**Héroe/heroína de ficción.**

Cyrano de Bergerac.

**Un concierto que recuerde con felicidad.**

El último de la fila.

**Un deseo para la ciencia cuántica.**

Que no deje de sorprendernos.

**Alguien a quien admire.**

Mi padre.

**Una cualidad para ser investigador.**

La constancia.

**Lo primero que se le viene a la mente al leer la palabra «juego».**

Aprender.

**¿Dulce o salado?**

Salado.

**Una serie.**

‘El Ministerio del Tiempo’.

**Su día favorito del año.**

El Día de Reyes.

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### **BLOQUE II**

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### **BLOQUE III**

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### **AYER Y MAÑANA**

#### **EPÍLOGO**

# Pensar en cuántico: una nueva lógica para una nueva ciencia.

## La próxima frontera del conocimiento.

Más allá del ruido mediático y las promesas hiperbólicas, la computación cuántica avanza con paso firme en laboratorios y centros de investigación. Una tecnología que promete cambiarlo todo —desde la farmacología a la ciberseguridad— y que alimenta una nueva carrera global. Pero, ¿cuánto hay de realidad y cuánto de deseo? Ignacio Cirac y David Pérez García, dos referentes mundiales, responden con rigor, medida y visión.

A mediados de los años noventa, un físico español y otro austriaco escribieron una fórmula que parecía sacada de un relato de ciencia ficción. En ella proponían cómo construir un ordenador que no siguiera las reglas del silicio, sino las del universo. Así nació el primer modelo teórico de ordenador cuántico.

El español era Ignacio Cirac, uno de los padres de la llamada «segunda revolución cuántica» y que desde el año 2001 dirige la prestigiosa división teórica del Instituto Max

Planck de Óptica Cuántica en Garching, Alemania.

«Hay una apuesta global por hacer realidad los ordenadores cuánticos»

**Ignacio Cirac**

Han pasado treinta años desde que, junto con su colega Peter Zoller, Cirac desarrollase aquella propuesta teórica para construir un ordenador cuántico mediante trampas de iones, en las que átomos cargados eléctricamente y enfriados son atrapados por un campo eléctrico y manipulados con láseres. Hoy, la técnica imaginada por Cirac aún es válida en un mundo que ve en la computación cuántica una especie de panacea que todo lo transforme.

«Sabemos desde hace años que la física cuántica tiene un enorme potencial para computar —explica Cirac—. Lo que ha cambiado en los últimos cinco años es que ahora hay una apuesta global, con gobiernos, empresas e inversores volcando recursos en hacer realidad estos ordenadores».

El entusiasmo que rodea a la computación cuántica se alimenta de una promesa irresistible: resolver problemas que hoy parecen intratables, desde descifrar códigos imposibles hasta simular moléculas para nuevos fármacos o entender mejor los materiales cuánticos.

Esta expectativa, amplificada por grandes inversiones de gobiernos y empresas tecnológicas, ha generado una

narrativa de inminencia que no siempre se corresponde con el estado real de la tecnología. «Muchas de las aplicaciones que se mencionan en titulares son todavía especulativas», advierte Ignacio Cirac. «Puede que lleguen, pero también es posible que tardemos diez o quince años más en alcanzar ordenadores cuánticos realmente útiles».

Aunque les separan más de 1.500 kilómetros, el matemático David Pérez García trabaja codo con codo con su admirado Cirac para tratar de dar forma a ese futuro cuántico que está por llegar. «Nos conocimos cuando hice una estancia postdoctoral en su grupo, en el Instituto Max Planck. Desde entonces, colaboramos de forma muy estrecha. Hemos publicado más de treinta artículos juntos», explica.

Ambos científicos están cosiendo una alianza única entre la física, las matemáticas y la computación que no sólo anticipa el futuro: lo está escribiendo.

Con esa humildad que caracteriza a los exploradores del conocimiento, Pérez comparte la visión de Cirac: «Se ha avanzado mucho, sí, pero en problemas artificiales. Aún no hemos demostrado ventajas cuánticas claras en tareas de interés práctico», explica para añadir que el camino es lento porque implica no solo desarrollar nuevas máquinas, sino también nuevas matemáticas, nuevos algoritmos y, sobre todo, una comprensión más profunda de cómo computa el universo. «No habrá un momento de explosión repentina; más bien, será una revolución que se infiltra de forma silenciosa, gradual y transformadora».

«Creamos teorías matemáticas nuevas para entender los sistemas cuánticos»

**David Pérez García**

La carrera espacial es ahora cuántica.

Las prometedoras expectativas de la cuántica han atraído inversiones multimillonarias. En la última década grandes tecnológicas han invertido millones de dólares en prototipos, las consultoras internacionales cifran en miles de millones un mercado todavía por crear y algunas 'start-ups' han alcanzado valoraciones desproporcionadas en relación con sus avances reales. Y todo ello mientras las grandes potencias libran una carrera similar a la que enfrentó a Estados Unidos y Rusia desde mediados de los años cincuenta por la conquista del espacio.

Estados Unidos, China y Europa compiten por liderar esta tecnología estratégica, conscientes de que el primer país que logre un ordenador cuántico funcional y estable podría obtener una ventaja decisiva en ciberseguridad, defensa, industria y conocimiento.

«No se trata sólo de ciencia», advierte Ignacio Cirac. «En esta carrera por construir ordenadores cuánticos hay un componente geopolítico muy fuerte. Primero por el impacto que tendrán en la seguridad y, segundo, porque probablemente permitirán aplicaciones que hoy en día no podemos imaginar ni comprobar».

Nadie duda a estas alturas que la competición cuántica no es sólo científica: también es estratégica. Mientras que Estados Unidos y China lideran el desarrollo del 'hardwa-

re', Europa destaca en el talento académico en un mundo que quiere las mejores herramientas no solo para mejorar la sanidad, el transporte o el medio ambiente, sino también algo tan estratégico como la seguridad o la lucha contra el fraude, el lavado de dinero o la ciberdelincuencia. Pero por el momento, son las grandes compañías las que movilizan la mayor inversión para convertir en realidad los hallazgos científicos.

«En Europa nos falta industria para competir en 'hardware' cuántico, pero estamos bien posicionados en talento y formación», señala Cirac.

«En 'hardware' se han producido avances significativos que han llevado a los primeros experimentos de supremacía cuántica»

**David Pérez García**

El mercado global de tecnología cuántica ha experimentado un crecimiento significativo, con más de 30.000 millones de dólares de financiación pública liderada por países como Estados Unidos, China o Reino Unido, y otros 10.000 millones de euros de capital privado. Las proyecciones apuntan a un mercado que alcanzaría entre 50 y 65 mil millones en 2030, con inversiones concentradas en computación, comunicaciones, sensores y criptografía cuántica, áreas en las que las tecnológicas están realizando inversiones estratégicas.

Pero para entender qué está en juego, conviene desmontar el mito. A menudo se presenta la computación cuántica como una tecnología mágica que multiplicará exponencialmente nuestra capacidad de cálculo. Y eso no es del todo así. O, al menos, no todavía.

«La computación cuántica no sustituirá al ordenador clásico. Será una herramienta muy especializada para ciertos problemas que los ordenadores actuales no pueden abordar», aclara Cirac.

Un ordenador cuántico no trabaja con bits (ceros y unos), sino con qubits, que pueden estar en varios estados a la vez gracias a la superposición cuántica. Además, pueden entrelazarse, generando correlaciones imposibles de replicar con máquinas clásicas. Eso abre la puerta a formas radicalmente nuevas de procesamiento de información.

«Pero no hay que perder de vista que estamos en los comienzos. Lo que tenemos hoy son prototipos muy limitados, con errores. La corrección de esos errores es el gran desafío técnico actual», advierte.

En ese ecosistema en el que abundan los titulares grandilocuentes, Cirac se muestra especialmente prudente: «Se oye mucho acerca de que la cuántica resolverá el cambio climático, curará enfermedades, transformará el transporte... Pero muchas de esas afirmaciones carecen de fundamento. Algunas incluso se hacen para inflar el valor de determinadas empresas. Hay que distinguir entre lo que conocemos, lo que esperamos... y lo que son puras elucubraciones».

¿Qué es entonces lo que sí sabemos? Que los ordena-

dores cuánticos podrían revolucionar la seguridad digital, ya que serán capaces de romper los actuales sistemas de cifrado. «Por eso muchos países compiten por ser los primeros. Quien los tenga podrá leer los mensajes cifrados de los demás. Eso tiene un impacto directo en la seguridad nacional y en la industria», señala Cirac.

«A nivel de 'hardware', se han producido avances muy significativos en los últimos años en varios tipos de dispositivos cuánticos: chips de circuitos superconductores, iones atrapados, pinzas ópticas en átomos de Rydberg... Esto ha conducido a los primeros experimentos de la llamada "supremacía cuántica": resultados obtenidos con ordenadores cuánticos que no se pueden simular con ordenadores clásicos», explica Pérez. «El gran problema sigue siendo el control del ruido para poder escalar los ordenadores actuales a tamaños más grandes que permitan implementar la llamada "computación cuántica tolerante a errores"».

# 30.000

**Millones de dólares para la cuántica.**

La tecnología cuántica ha recibido más de 30.000 millones de dólares de financiación pública liderada por países como Estados Unidos, China o Reino Unido.

---

**«LA CUÁNTICA TIENE  
IMPACTO DIRECTO EN  
LA SEGURIDAD Y LA  
INDUSTRIA»**

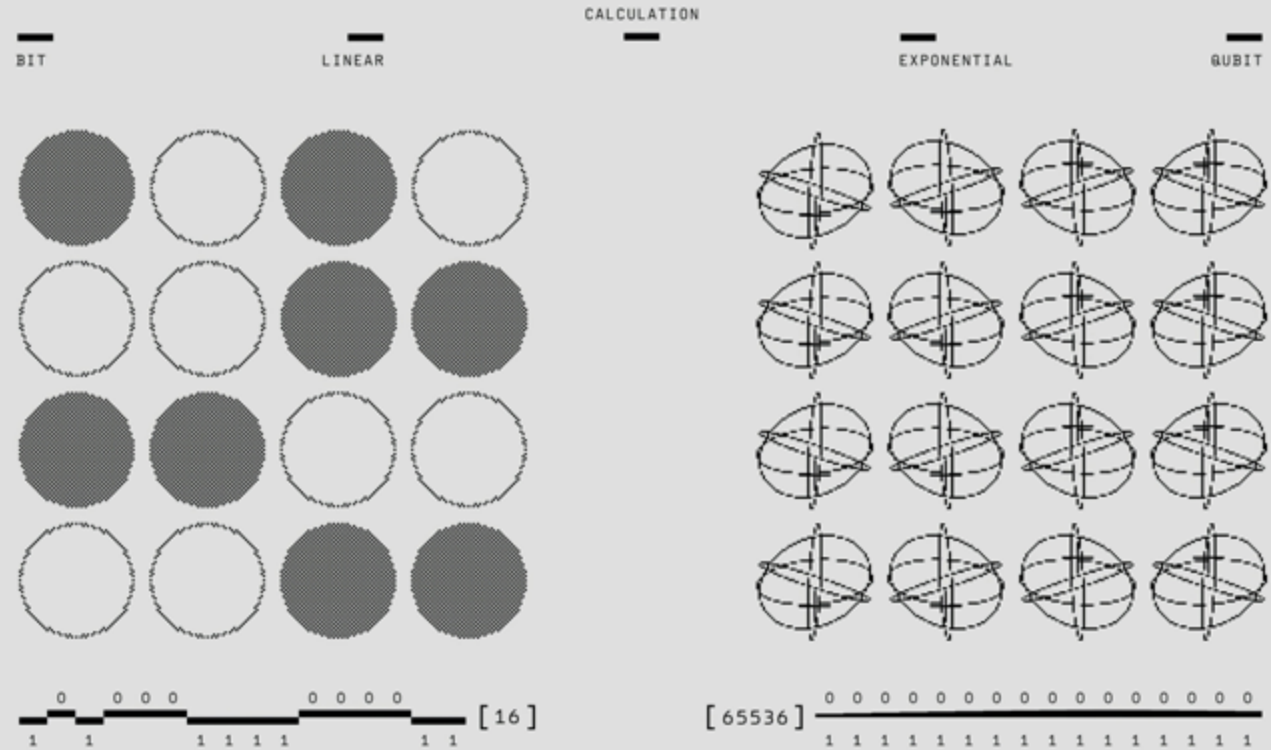
**Ignacio Cirac**

**«SERÁ UNA REVOLUCIÓN  
SILENCIOSA, GRADUAL  
Y TRANSFORMADORA»**

**David Pérez García**

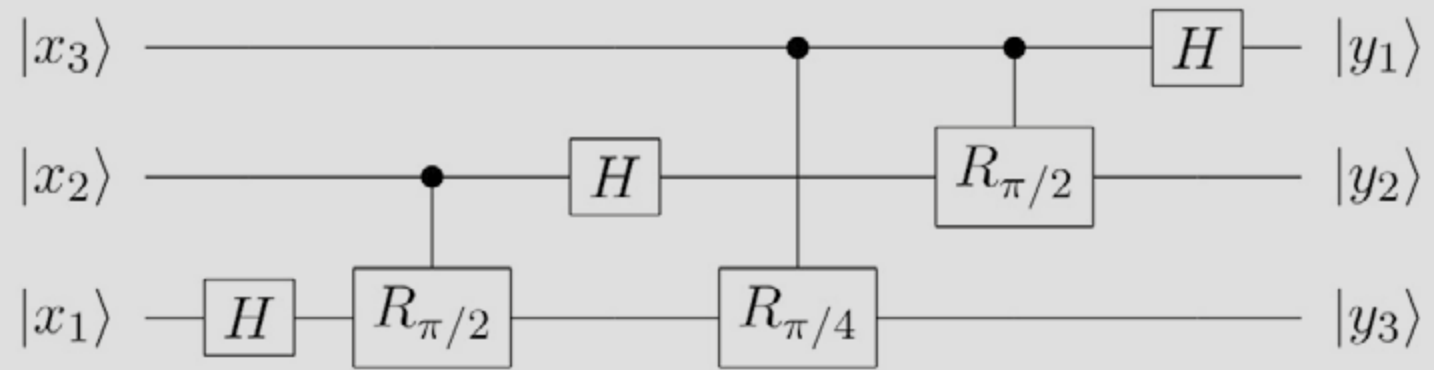
A diferencia de la computación clásica, que opera con un sistema binario en bits, la computación cuántica codifica la información en sistemas cuánticos con dos estados propios, llamados qubits.

Imagen: Google Deep Mind.



La transformada cuántica de Fourier (QFT), un análogo cuántico de la clásica transformada discreta de Fourier (DFT), es fundamental en la computación cuántica y la base de muchos algoritmos cuánticos.

Imagen: Bender2k14, CC BY-SA 3.0.



En cuanto al 'software', Pérez también es bastante prudente: «Más allá de problemas de indudable interés científico asociados con simulaciones de sistemas cuánticos, y del famoso algoritmo de Shor, que permitiría romper todos los cifrados actuales, ni siquiera está claro a día de hoy, qué problemas relevantes a nivel social, industrial o empresarial, podría resolver un ordenador cuántico de gran tamaño y tolerante a errores, que no pueda hacer un ordenador clásico».

En su opinión, los principales avances se han dado en la simulación de sistemas cuánticos. «Esta es, precisamente, la aplicación que propuso Feynman en 1981 para proponer los ordenadores cuánticos por primera vez. La idea es usar un sistema cuántico del que se tiene un gran control, para simular el comportamiento de otro. Esto ha servido para descubrir nuevos efectos cuánticos asociados con la superconductividad o la termalización, o para validar otros de los que solo se tenía una idea cualitativa. De hecho, fue también Ignacio Cirac el que propuso los primeros simuladores cuánticos basados en redes ópticas».

«Descubres formas nuevas de pensar.  
Es una manera cuántica de ver el mundo»

**Ignacio Cirac**

## De la física a las matemáticas, y vuelta.

---

Una de las áreas más fértiles de esta revolución se encuentra en la confluencia de esas dos disciplinas que, tradicionalmente, han caminado en paralelo: física y matemáticas. Es ahí donde florece la colaboración entre Cirac y Pérez García.

«Nosotros desarrollamos teorías matemáticas nuevas para entender los sistemas cuánticos —explica Pérez—. Por ejemplo, hemos trabajado mucho en las redes de tensores, estructuras diseñadas para describir sistemas de muchos cuerpos».

Pero el hallazgo más fascinante es que esas herramientas, pensadas para computación cuántica, están sirviendo también para mejorar la computación clásica.

«Lo fascinante de trabajar en computación cuántica» —explica Cirac— «es que muchas veces, al intentar resolver un problema técnico, descubres formas nuevas de pensar. Nos pasa que encontramos soluciones útiles incluso sin necesidad de usar un ordenador cuántico. Es una lógica distinta. Una manera cuántica de ver el mundo».

«De ahí han nacido algoritmos clásicos, inspirados en la cuántica, que son más eficientes. Algunos mejoran los tiempos de cálculo, otros permiten trabajar con menos memoria o garantizan más privacidad».

«Uno de los avances más interesantes ha sido la aparición de algoritmos clásicos que han surgido simplemente

de pensar los problemas de forma cuántica», coincide Pérez para añadir que estos logros han trascendido de la teoría a la práctica. «Numerosas 'start-ups', como las españolas Multiverse Computing o Inspiration-Q, están explotando comercialmente estos algoritmos de inspiración cuántica», señala Pérez.

Estas compañías no están esperando a que llegue el ordenador cuántico definitivo. Su valor radica en adaptar la lógica cuántica —o más exactamente, la lógica inspirada por ella— a problemas clásicos de la industria.

Como señala Pérez, «se han utilizado para obtener algoritmos mejores, en tiempo, memoria o privacidad, en distintos contextos, como la resolución de Ecuaciones Diferenciales, o el Aprendizaje Automático». Multiverse, por ejemplo, ya aplica estas técnicas en el sector financiero para optimizar carteras o gestionar riesgos, mientras que otras como Inspiration-Q exploran su uso en logística y predicción.

«Las tecnologías cuánticas formarán parte de nuestra vida cotidiana»

**Ignacio Cirac**

La computación cuántica también promete impacto en áreas estratégicas. ¿Pero cuánto hay de realidad? Cirac es claro: «Por ahora, la inteligencia artificial solo se beneficia en casos muy concretos, como la clasificación de datos mediante

cálculos que algunos algoritmos cuánticos hacen más rápido. Pero aún es muy especulativo hablar de un impacto masivo».

Uno de esos casos, explica Cirac, tiene que ver con tareas de clasificación. «Para esa clasificación existen unas cantidades que se llaman 'Betti numbers'. Y esos números se pueden calcular más rápido con ordenadores cuánticos que con los clásicos», señala. Y matiza que, tras un periodo de escepticismo, nuevas investigaciones han reavivado el interés al mostrar que sí podría haber una ganancia cuántica en el contexto de la inteligencia artificial.

Frente al 'hype', Cirac pide perspectiva: «No va a ser como encender una luz. No habrá un día sin cuántica y al siguiente todo será cuántico. Es un proceso que se irá infiltrando poco a poco, como ocurrió con los 'smartphones' o internet».

«Ya lo estamos viendo con los sensores cuánticos, que son más fáciles de implementar y están más cerca de aplicaciones reales —añade—. La computación cuántica vendrá después. Y para eso, necesitamos inversión... y paciencia».

Una paciencia que conviene combinar con visión estratégica. «Estas cosas del laboratorio a la industria no se hacen en dos años ni en cinco», insiste. Sin embargo, también recuerda que ya se han dado pasos clave: «Ya se hicieron las primeras demostraciones de que se podían corregir errores y eso también ha despertado grandes expectativas empujando la computación».

Pérez lo resume con claridad: «Tal vez para dentro de cinco o diez años sí que se haya logrado un resultado de supremacía cuántica en problemas de interés». Hasta entonces,

### **Aplicaciones actuales de la cuántica.**

Algunos sectores ya adaptan la lógica cuántica a problemas clásicos de la industria.

Logística.  
Finanzas.  
'Machine learning'.  
Datos.

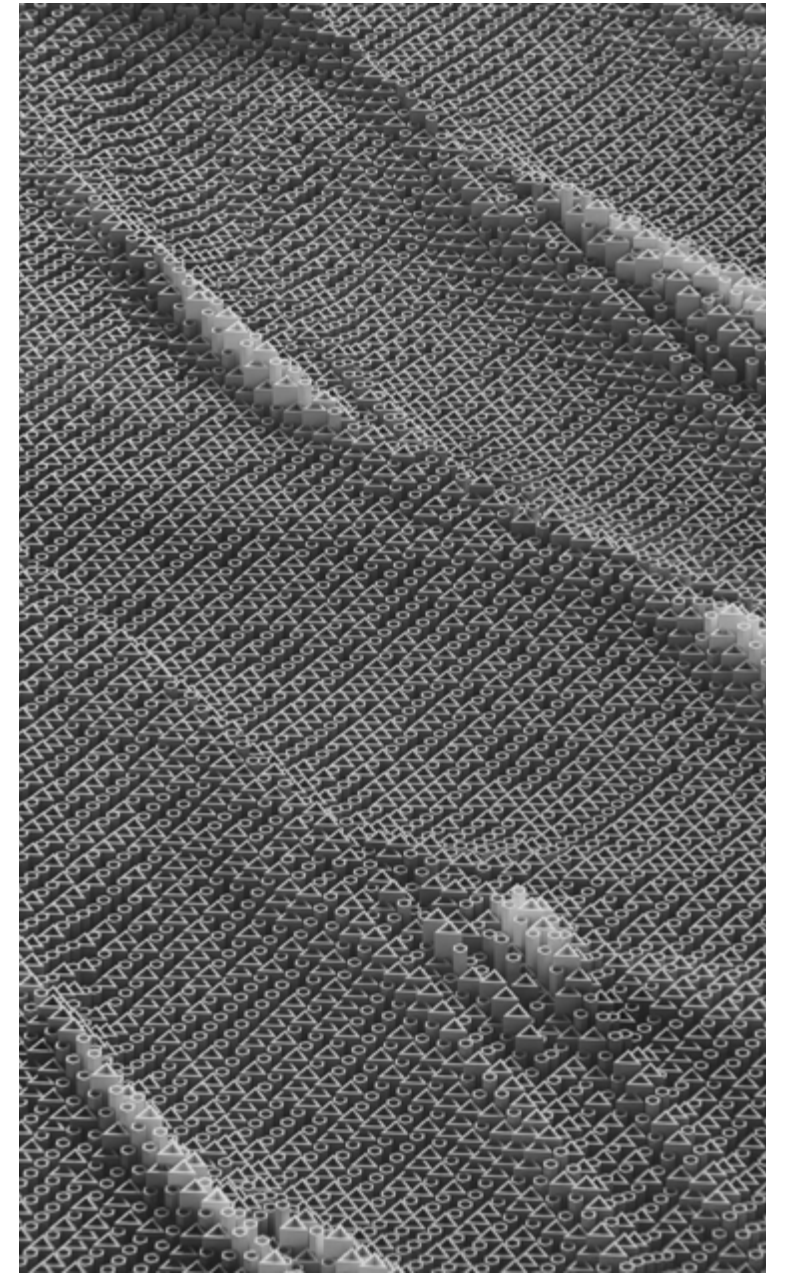
las inversiones más determinantes serán las que se destinen a formar talento, reforzar la infraestructura y sostener la investigación básica. Como recuerda el propio Pérez, «en España tenemos un claro déficit de formación en el tema, especialmente en los perfiles teóricos necesarios para el desarrollo de nuevos algoritmos».

Mientras tanto, Cirac y Pérez García seguirán a lo suyo: explorar el lenguaje de la realidad más allá de lo visible. A caballo entre la teoría y la experimentación, entre Múnich y Madrid, entre las partículas y las ecuaciones, sin prisa, pero sin pausa.

Porque en un mundo acostumbrado a medir el progreso por la velocidad de sus titulares, la física cuántica impone otros ritmos. Exige tiempo, colaboración y una comprensión radical de lo complejo. No hay atajos para alterar las reglas mismas de la información. Pero ahí radica precisamente su poder: en su capacidad para enseñarnos a pensar de otra forma, incluso antes de que lleguen las grandes aplicaciones.

«Estoy seguro de que, a largo plazo, las tecnologías cuánticas formarán parte de nuestra vida cotidiana —reflexiona Ignacio Cirac—. Nos darán todo lo que tenemos... y mucho más. Pero hay que tener paciencia».

Paciencia. Tal vez sea esa la condición más revolucionaria de todas.



## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### BLOQUE II

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### BLOQUE III

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### AYER Y MAÑANA

#### EPÍLOGO

# NANOCIENCIA

## Mínimos enormes

Nanotecnología y materiales que construyen nuestro mundo.  
**Nazarío Martín y María Varela del Arco.**





**Nazario Martín**



**María Varela del Arco**

## PRÓLOGO

## MUY HUMANOS

### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

## AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Nazario Martín

**Madrid, 25 de marzo de 1956**

**Ingreso en la RAC: 24 de mayo de 2023**

Nazario Martín León es catedrático de Química Orgánica en la Universidad Complutense de Madrid y uno de los mayores expertos internacionales en química de materiales moleculares y nanoestructuras de carbono.

Doctor en Ciencias Químicas con Premio Extraordinario (UCM, 1984), realizó estancias postdoctorales en Alemania, EE.UU. y Francia. Su investigación ha sido pionera en la funcionalización de fullerenos, la catálisis asimétrica sobre estas moléculas y la transferencia electrónica fotoinducida, imitando la fotosíntesis natural. Más recientemente, trabaja en electrónica molecular basada en moléculas orgánicas sobre superficies sólidas.

Fue presidente de la Real Sociedad Española de Química y es cofundador del Instituto IMDEA- Nanociencia. Miembro de la Real Academia de Doctores de España y Fellow de la Royal Society of Chemistry, ha recibido, entre otros, el Premio Jaime I a la Investigación Básica (2012) y el Premio Nacional Enrique Moles (2020).

Uno de los químicos más citados en España y activo divulgador, ha sido editor en revistas internacionales de prestigio como 'Chemical Communications'.

### **Saber más**

Personal y transferible.

**Un lugar de Madrid.**

En la ciudad, la parte histórica.  
En la provincia, Miraflores de la Sierra.

**Una esperanza.**

Que la educación y la ciencia alcancen el nivel que precisa nuestro país.

**Un momento de descanso.**

Cuando, después de una jornada dura de trabajo, te das cuenta de que lo obtenido ha sido estupendo y casi increíble.

**Cuando lee la palabra «carbono», ¿qué es lo primero que piensa?**

Lo voy a pasar bien... Es un reto y una pasión.

**Persona que más le inspira.**

Un científico de prestigio, ya mayor, dando una conferencia sobre su ciencia. Eso es ver una vida dedicada a algo pasional y retador.

**Una comida.**

Jamón de calidad.

**¿Una máxima?**

En un guiño a mi gran amigo Miguel A. Alario, diría una que él

atribuía a Confucio: «Encuentra un trabajo que te guste y no tendrás que trabajar nunca más». Si es una máxima más personal, algo que siempre he dicho a mis estudiantes: «Elige bien lo que vas a hacer, porque cuando haces una cosa, estás dejando de hacer otra».

**Una tecnología.**

La nanotecnología.

**Inventor/a favorito/a de la ciencia.**

Michael Faraday, el descubridor de la molécula de benceno. Sin embargo, isiempre me fascinó el efecto fotoeléctrico en el que se basan las células fotovoltaicas!

**Una película.**

'Ben-Hur', 'El Padrino' y 'La vida es bella'.

**Su mayor aprendizaje tras vivir en distintos países.**

Que las personas no somos tan diferentes.

**Una obra de arte.**

La Tabla periódica de los Elementos Químicos.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# María Varela del Arco

**Madrid, 31 de julio de 1974**

**Ingreso en la RAC: 22 de mayo de 2024**

María Varela del Arco es doctora en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid, catedrática de Física de la Materia Condensada en la misma institución y directora del Centro Nacional de Microscopía Electrónica (ICTS ELECMI).

Su investigación se sitúa en la frontera entre la física de la materia condensada, la nanotecnología y la química de materiales, con especial enfoque en la caracterización a escala atómica de materiales funcionales mediante técnicas avanzadas de microscopía electrónica. Desarrolló gran parte de su carrera en el Oak Ridge National Laboratory (EE. UU.), donde alcanzó el rango de Distinguished Research Staff Member.

Ha publicado cerca de doscientos setenta artículos científicos y liderado proyectos del Departamento de Energía de EE.UU., el Consejo Europeo de Investigación (ERC) y el Ministerio de Ciencia. Actualmente coordina la subárea de materiales funcionales de la Agencia Estatal de Investigación.

Ha recibido premios como la ERC Starting Grant (2009), la Burton Medal de la Microscopy Society of America (2014) y la Beca Leonardo de la Fundación BBVA (2015). Es Fellow de la American Physical Society y miembro activo de diversas sociedades científicas internacionales.

**Saber más**

Personal y transferible.

**Un lugar favorito de Madrid.**

El barrio de los Austrias.

**Un postre.**

La tarta de manzana.

**Mayor reto que se dibuja en su horizonte profesional.**

La inteligencia artificial.

**Un miedo.**

A las aguas mansas.

**Invento favorito de la ciencia.**

El microscopio.

**Qué le genera estrés.**

El 'overbooking'.

**Un material.**

Los metales de transición.

**¿Dónde estaba cuando miró por primera vez a través de un microscopio y qué recuerda de aquel instante?**

Con mi abuelo. Me regaló uno y miramos la pata de una mosca. Era increíble que cupiera tanto detalle en una cosa tan pequeña.

Aún lo guardo.

**Héroe/ Heroína de ficción.**

Batman.

**En la vida real, persona que más admira.**

¿Puedo decir a la que menos?

Donald Trump.

**Una tecnología.**

Nanotecnología.

**¿Una máxima?**

Elige tus batallas.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

#### EPÍLOGO

# La importancia de las pequeñas cosas.

## Reescribir la tecnología desde lo invisible.

En la escala del nanómetro, la materia revela propiedades que transforman nuestra tecnología. De las células solares de perovskitas a las terapias antivirales basadas en fullereno vamos a tratar de aterrizar conceptos complejos pero vitales para nuestras vidas. La química de Nazario Martín y la microscopía atómica de María Varela, que están trazando un nuevo mapa de lo posible, nos explican cómo la nanociencia, invisible al ojo humano, se ha convertido en una fuerza visible de cambio.

Hay un universo que no podemos ver, pero que sostiene el que sí vemos. Bajo cada chip, pantalla o tratamiento médico late una estructura tan pequeña que escapa a la luz. Es allí, en la escala del nanómetro, donde trabajan Nazario Martín y María Varela. Él diseña moléculas como arquitecto de nuevos materiales. Ella las fotografía, átomo a átomo, como quien retrata la intimidad más profunda de la materia.

«Yo saco fotos de átomos» explica cuando le pedimos una

definición sencilla de su trabajo María Varela, catedrática de Física de la Materia Condensada y directora del Centro de Microscopía Electrónica de la UCM. Sus imágenes, tomadas con microscopios del tamaño de un armario, revelan cómo los átomos se ordenan, se repelen o se fusionan. Porque todo —la dureza, la transparencia, la conductividad— depende de eso: de qué átomos hay y cómo se enlazan.

«Saco fotos de átomos.  
Es ahí donde ocurren cosas»

**María Varela del Arco**

Los microscopios que maneja pueden llegar a medir cinco metros de altura y aumentar la imagen de una muestra más de cien millones de veces. No se trata solo de observar: en su centro se aplican campos eléctricos, magnéticos o de calor mientras se visualizan los cambios estructurales en tiempo real. «Es como un telescopio del revés», dice Varela. «Pero no miramos galaxias, miramos vacantes atómicas, defectos, movimientos de iones. Es ahí donde ocurren cosas».

Todo ello en base a la capacidad de observar los materiales a escalas infinitesimales, invisibles para el ojo humano. Y es que estas «fotos» a las que se refiere Varela se realizan con una resolución atómica gracias a los avances de la microscopía electrónica.

Nazario Martín, catedrático de Química Orgánica y pio-

nero en la química del carbono, lo ve desde el otro lado del espejo, al estudiar la química que hay detrás de las nanoestructuras que muestra Varela para crear materiales. «La materia muestra nuevas propiedades si reducimos su tamaño por debajo de una cierta longitud crítica», explica. «La nanociencia se ocupa de la materia de dimensiones comprendidas entre 1 y 100 nanómetros (nm). Para hacernos una idea, los virus suelen tener un tamaño de entre 50 y 100 nm, mucho más pequeños que una célula. Sin embargo, nos interesa, más que su concepto, lo que representa potencialmente dentro del conjunto de investigaciones y aplicaciones actuales cuyo propósito es crear nuevas estructuras y productos que tendrían un gran impacto social, ya sea en la industria, la medicina, etc.».

Poniendo de manifiesto su capacidad docente, Martín nos explica de qué manera la nanométrica nos permite ver cambios en la funcionalidad de un material.

«Todo el mundo conoce el oro y lo lleva frecuentemente como un anillo que no cambia de color, es estable y no altera sus propiedades cuando lo vemos a tamaño macroscópico de modo cotidiano. Sin embargo, si vamos reduciendo su tamaño a la escala nanométrica, las nanopartículas de oro en suspensión (coloides) presentan diferentes colores según el tamaño e incluso la forma. Además, ciertas nanopartículas de oro pueden actuar como catalizadores capaces de transformar gases venenosos, como por ejemplo de los tubos de escape de los automóviles, en gases no tóxicos. Este hecho aparentemente poco importante, es lo que permite que ac-

tualmente podamos vivir en las grandes ciudades. Por cierto, la naturaleza está llena de ejemplos, animo a que los lectores entren en internet y los busquen».

Su grupo de Química Orgánica en la Complutense madrileña, sin ir más lejos, trabaja con moléculas que combinan la estructura de un fullereno (una molécula compuesta por carbono similar al grafito) con grupos glucídicos –en esferas de carbono del tamaño de un nanómetro– que han logrado bloquear en laboratorio virus como el Ébola, el Zika o el SARS-CoV-2.

«Ciertas nanopartículas de oro permiten que podamos vivir en las ciudades»

**Nazario Martín**

«Estos glicofullerenos (constituidos únicamente por 60 átomos de carbono) compiten favorablemente con los virus de Ébola, Zika, Dengue, o SARS-CoV-2 por unirse al receptor celular que permite su entrada en la célula, infectándola hasta su muerte. En presencia de los glicofullerenos, estos virus no pueden abrir la entrada a la célula, ya que los receptores celulares están unidos a nuestras moléculas, impidiendo, así, su entrada. Estos han sido estudios ‘in vivo’ que necesitarían de estudios posteriores muy complejos para llegar a utilidad práctica».

Pero la aplicación de sus estudios también beneficia a

otras industrias tan básicas como la energía gracias al diseño de moléculas para transportar carga eléctrica en células solares hechas con un material de estructura cristalina que ha ganado interés por su potencial para la fabricación de células solares de alta eficiencia, flexibles y económicas llamado perovskita. «En un trabajo reciente se han conseguido eficiencias por encima del 25% de conversión de luz en electricidad, con extraordinarios comportamientos de estabilidad, aspecto este tan importante como la propia eficiencia», explica tras señalar con orgullo que el instituto que preside —IMDEA-Nanociencia— montó el primer laboratorio de fabricación de células fotovoltaicas de la Comunidad de Madrid. En un país como España, con recurso solar abundante, la capacidad de fabricar tecnologías eficientes y asequibles puede marcar una diferencia estratégica.

---

# 1-100

**Tamaño en nanómetros.**

La materia de la que se ocupa la nanociencia tiene un tamaño en nanómetros comprendido en este rango.

**«QUIENES CONTROLAN  
LOS MATERIALES,  
CONTROLAN  
LA TECNOLOGÍA»**

**Nazario Martín**

**«HAY QUE EXPLORAR  
MUCHO PARA  
ENCONTRAR ALGO  
ÚTIL. SIN IDEAS,  
NO HAY AVANCE»**

**María Varela del Arco**

## Ciencia que se ve y se toca.

---

Desde sus respectivos campos de especialización, la física y el químico centrados en la materia coinciden en que esta revolución de las «pequeñas cosas» ya no es cosa del futuro, sino que forman parte de la cotidianidad y puede ayudar a resolver cuestiones básicas para el desarrollo de las economías y sociedades, con nanotecnología en chips pero también en cremas solares, tejidos o medicamentos.

«La revolución de lo pequeño, la nanociencia y la nanotecnología, ha representado ciertamente una ola de innovación que ya está en la sociedad y, actualmente, hay muchísimos dispositivos optoelectrónicos fabricados en la escala nanométrica», explica Martín. Algunos ejemplos son células fotovoltaicas, chips para ordenadores, LEDs para televisores, pero también nanopartículas en cremas solares, tejidos, fármacos, materiales y un largo etcétera. La nanotecnología ya está con nosotros.

Varela lo confirma con otros ejemplos: nanopartículas magnéticas que «se llevan por el cuerpo y se calientan localmente donde esté un tumor», o materiales que mejoran su capacidad tras ser sometidos a ciclos de carga y descarga. «Hay materiales que ciclan mejor cuanto más los ciclas. Eso antes era impensable».

Y detrás de cada una de esas propiedades hay una historia de curiosidad microscópica: «Queremos ver qué pasa

cuando un ion se queda atrapado, cuando un hilo se funde, cuando un defecto se mueve. A veces, eso cambia todo».

Esa obsesión por mirar lo invisible encuentra su espejo en la síntesis molecular. «Quienes controlan los materiales, controlan la tecnología», recuerda Martín, citando al asesor de Panasonic Eiji Kobayashi. La afirmación no es retórica.

«El escenario internacional nos hace ver que los elementos químicos de los que se hacen los nuevos materiales pueden crear ambiciones imperialistas por el control, por ejemplo, de las denominadas tierras raras, los elementos químicos imprescindibles para el desarrollo de la tecnología actual más avanzada». Como afirma el investigador, las guerras por las tierras raras y la dependencia de materiales estratégicos están redibujando la geopolítica global. «Los nuevos materiales están en la base de todo, desde los teléfonos hasta los misiles», alerta.

«La gran mayoría de las tierras raras están en manos de China. Estamos viendo que otros países necesitan asegurarse como sea el control de las que existen en otros lugares del planeta. La ciencia y la tecnología deben estar al servicio de la humanidad, por tanto, pensemos en que los recursos del planeta donde todos habitamos se usen de modo sensato», advierte.



La perovskita, un mineral compuesto por óxidos de calcio y titanio, ha ganado interés para la fabricación de células solares fotovoltaicas por su eficiencia, flexibilidad y bajo coste.

Imagen: Rob Lavinsky, iRocks.com  
- CC-BY-SA-3.0.



El dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es un compuesto químico abundante en las arenas que se utiliza como material en industrias como la aeroespacial, la fotovoltaica, la electrónica y la metalúrgica.

Imagen: Sumner Mahaffey.

Pero para llegar ahí, hay que empezar muy atrás. «El 98% de las cosas que yo voy a hacer en mi vida no valen para nada», ironiza Varela antes de explicar la hipérbole: «no es que no valgan, es que necesitas explorar mucho para poder encontrar algo útil. Sin ideas de bombero, no hay avance», bromea. Martín coincide: «Como suele decirse, la investigación no sabe de atajos y si algún día faltara, no habría futuro».

La dificultad estriba en que muchas veces ese trabajo no encuentra un cauce hacia la industria. Varela es tajante: «Un gran problema en España es la falta de financiación del sistema científico y, en paralelo, la ausencia de un sistema industrial potente que esté dispuesto a absorber y desarrollar los descubrimientos fundamentales para tornarlos en un producto. La economía española está basada en otros factores, como el turismo». Martín aporta un matiz: «el papel actual de España está relativamente equilibrado mediante el papel que juegan las universidades, el CSIC y los nuevos institutos de reciente creación extendidos por diferentes comunidades autónomas. También, y cada vez más, con el concurso de los centros privados de investigación del mundo empresarial que, sin embargo, están muy polarizados en determinados sectores».

Pero en un país que destaca por la calidad de sus científicos en todas las ramas, incluso así, los centros como el que

dirige Varela bullen de actividad: «Vienen médicos, físicos, químicos, geólogos, incluso empresas privadas. Una vez vino una compañía de champú a mirar fibras capilares en el microscopio. «Les hicimos una foto, literal». Con el frenesí propio solo de quienes aman su oficio, explica que en sus «oficinas» también han observado muestras del volcán de La Palma, de materiales bidimensionales para matar células tumorales o de compuestos para espintrónica, esa nueva rama de la electrónica que transporta espín en lugar de corriente, y que no calienta los circuitos.

«Cuando trabajas con alguien de otro campo, sus preguntas te abren avenidas que no habrías imaginado. Ahí nace la creatividad»

**María Varela del Arco**

Y es que la base de todos estos avances, además de en la financiación, se basa en la puesta en común de necesidades y hallazgos y el carácter transversal de los estudios y sus aplicaciones. «La ciencia es un juego de equipo», resume Varela. «Cuando trabajas con alguien de otro campo, sus preguntas te abren avenidas que no habrías imaginado. Ahí nace la creatividad».

En ese futuro, tanto la IA como los materiales bidimensionales jugarán un papel creciente. Varela lo explica con una metáfora afilada: «La inteligencia artificial encuentra lo que le dices que busque, pero no lo que no se te ha ocurrido. Yo

puedo decirle que busque azul y amarillo, pero si hay verde, no lo va a ver. El humano, sí».

Las aplicaciones se extienden a campos inesperados: tejidos que no se mojan, pinturas que generan electricidad, materiales que resisten mejor el desgaste. «Todo eso empieza por mirar en profundidad y detalle», resume Varela. Y también por entender cómo unos átomos afectan a otros, especialmente en las fronteras. «Me gusta ver qué pasa cuando juntas dos cosas que se odian: un superconductor y un material magnético. ¿Se anulan? ¿Surge algo nuevo?»

De ese juego de tensiones, defectos y estructuras surgen materiales que pueden cambiar la forma en que almacenamos energía, tratamos enfermedades o construimos nuestras ciudades. Y todo empieza a una escala donde nada se ve, pero todo sucede.

«Hace cien años nadie podía imaginar un teléfono en el bolsillo», dice Varela. «Pero todo lo que usamos hoy ha venido del desarrollo de materiales». Y si la humanidad sigue aquí dentro de un siglo, probablemente mirará atrás y recordará esta era por sus átomos. La edad del silicio, la del grafeno, la de lo infinitamente pequeño.

«Porque al final», añade Martín, «la nanotecnología no tiene fronteras. Solo imaginación».

«Todo lo que usamos hoy ha venido del desarrollo de materiales»

**María Varela del Arco**

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

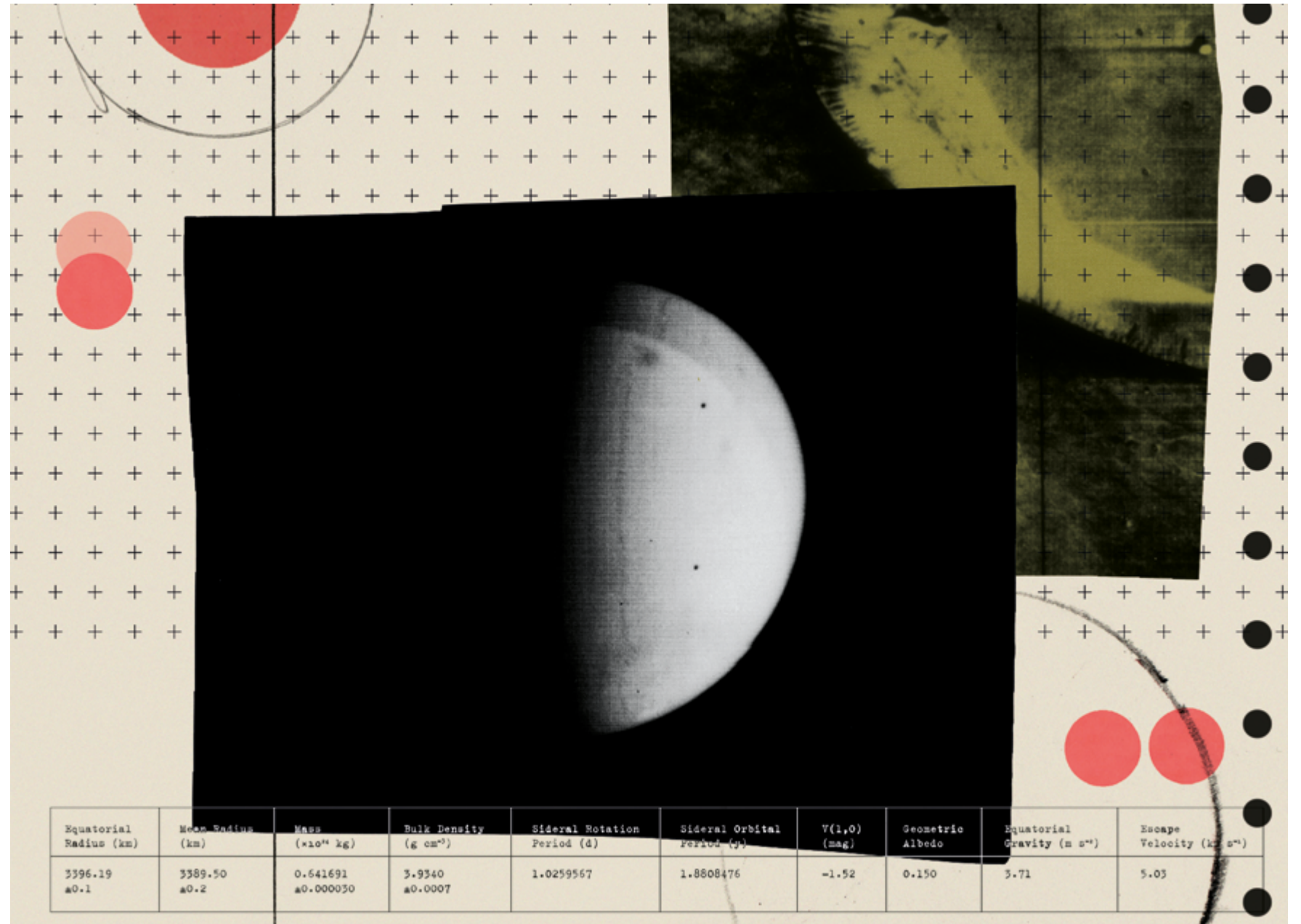
## EPÍLOGO

# VISIÓN DEL COSMOS

## Marte en tu GPS

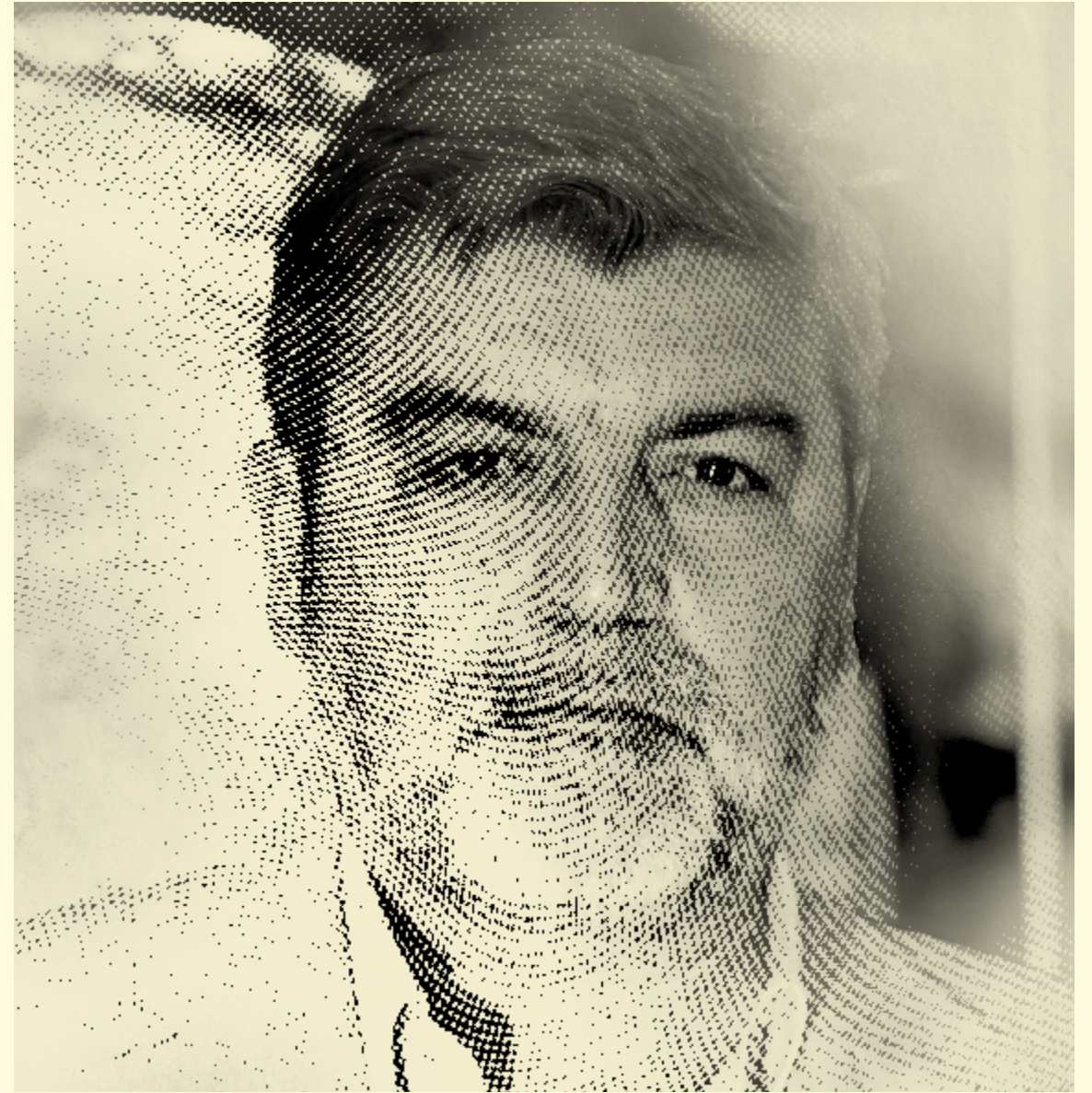
Regalos de explorar el cosmos.

**Jon Marcaide y Jesús Martínez Frías.**





**Jon Marcaide**



**Jesús Martínez Frías**

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Jon Marcaide

**Elgueta, 21 de agosto de 1950**

**Ingreso en la RAC: 30 de mayo de 2007**

Juan María (Jon) Marcaide es doctor en Física por el Massachusetts Institute of Technology (MIT) y profesor de investigación del CSIC. Se licenció en Física por la Universidad de Zaragoza en 1975 y fue catedrático de Astronomía y Astrofísica en la Universidad de Valencia

Especialista en radio interferometría de muy larga base (VLBI), realizó contribuciones pioneras en radio astrometría diferencial, supernovas de radio, lentes gravitacionales y el centro galáctico. Ha publicado más de trescientos artículos científicos —incluidos siete trabajos en 'Nature' y 'Science'— y ha dirigido once tesis doctorales.

Fue asesor de la NASA, cofundador y presidente de la Sociedad Española de Astronomía, y primer director del Departamento de Astronomía y Astrofísica de la Universidad de Valencia. Ha sido también profesor visitante en el Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics y astrónomo invitado en el Observatoire de Paris.

Entre sus distinciones figuran el Premio Euskadi de Investigación (2004), su ingreso como académico numerario en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España (2003) y su pertenencia a Jakiunde, la Academia Vasca de las Ciencias, las Artes y las Letras.

## Saber más

Personal y transferible.

**Un color.**

Azul.

**Una sensación que le provoque el universo.**

Belleza.

**En qué piensa cuando mira a las estrellas.**

En lo bella que es esa vista.

**¿De qué siente más orgullo?**

De haber contribuido a mi país y de los logros de mis hijos naturales y de mis hijos científicos.

**Mayor reto que se dibuja en su horizonte profesional.**

Seguir colaborando en investigación mientras tenga salud.

**Una maravilla terrenal.**

¡Hay tantas!

**¿Qué está leyendo estos días?**

Como siempre varias cosas en paralelo: 'Oppenheimer', 'Soldados de Salamina', 'La ciudad y los perros', 'Rojo y Negro', 'A Man in Full'...

**Un sonido.**

El chocar de las olas del mar.

**Un miedo.**

Perder la salud y no poder viajar y leer todo lo que quisiera leer.

**Un recuerdo de su infancia.**

Mis largos ratos en medio de la naturaleza en los campos del caserío de mi familia materna donde nació.

**Una receta.**

Puerros con patatas. Muy sencillo de preparar.

**Su momento favorito del día.**

El momento en que me levanto y abro la ventana, sobre todo si veo el cielo azul.

**Un/a héroe/heroína de ficción.**

No tengo. De niño quizás fue el Capitán Trueno.

**Un lugar al que volver.**

Entre otros muchos, Edimburgo y Escocia, donde estudié un año crucial para mí.

**Un astro.**

El Sol.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Jesús Martínez Frías

**Madrid, 3 de octubre de 1960**

**Ingreso en la RAC: 26 de junio de 2024**

Jesús Martínez Frías es doctor en Ciencias Geológicas por la Universidad Complutense de Madrid y experto en meteoritos, geología planetaria y astrobiología. Es investigador científico en el Instituto de Geociencias (CSIC-UCM), donde fundó y lidera el Grupo de Investigación de Meteoritos y Geociencias Planetarias del CSIC.

Ha desarrollado una destacada trayectoria internacional con estancias en centros como las universidades de Leeds, Heidelberg, Toronto y California-San Diego. Es fundador y presidente de la Red Española de Planetología y Astrobiología (REDESPA) y de la Comisión de Geología Planetaria de la Sociedad Geológica de España. Ha participado en más de cincuenta proyectos nacionales e internacionales (NASA, ESA, ICSU, UNESCO, entre otros) y en varias misiones espaciales, como NASA-MSL (Curiosity), Mars 2020 (Perseverance), ESA-ExoMars y el proyecto BIOMEX de la ESA.

Ha publicado más de trescientos sesenta trabajos científicos, es autor o editor de catorce libros y ha dirigido ocho tesis doctorales. Entre sus distinciones, cuatro premios de la NASA, ocho de la ESA por la instrucción de astronautas, la Placa de Honor de la Asociación Española de Científicos y el Premio de la Unión Árabe de Geociencias.

**Saber más**

Personal y transferible.

**Mineral favorito.**

Jarosita.

**El Sistema Solar, en una palabra.**

Majestuoso.

**Algo que le siga maravillando.**

La bondad.

**Una persona que inspire sus días.**

Carl Sagan.

**¿Un pasatiempo?**

Leer escuchando música.

**El primer viaje que recuerda.**

Canarias.

**Una novela.**

‘La Fundación’, de Asimov.

**Un lugar en el que relajarse.**

La montaña.

**Una cualidad que valore en sus colegas de profesión.**

Tolerancia.

**Plato que más disfruta.**

Filete y huevos fritos con patatas.

**El invento científico que más le impresionó.**

Los Rayos X.

**Un reconocimiento que le haya conmovido.**

Dos: estar en la agenda del Instituto Calderón de la Barca donde estudié y tener un laboratorio de astrobiología que lleva mi nombre en Arequipa (Perú).

**Deporte favorito.**

Senderismo.

**Dónde estaba cuando identificó un cometa por primera vez y qué nombre tenía.**

Halley, estaba en Madrid.

**Un/a explorador/a espacial a quien admire.**

El geólogo y astronauta Harrison Schmitt.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Dos formas de mirar el cosmos: entre Marte y cuásares.

De lo infinito a lo humano,  
un viaje espacial.

«Rara vez pienso en lo que sé que hay detrás de ese cielo estrellado. Más bien pienso en lo afortunado que soy de poder sentirlo». Así describe Jon Marcaide, pionero de la astrofísica radiointerferométrica, lo que le despierta la visión nocturna del firmamento. La respuesta no es menos emotiva para Jesús Martínez Frías, geólogo planetario y astrobiólogo con décadas de trayectoria en las misiones marcianas de la NASA: «El cielo tiene una componente científica indudable... pero también algo enigmático que nos conmueve en lo más profundo de nuestro ser».

Ambos miran hacia arriba, pero lo hacen desde extremos diferentes de la ciencia. Uno estudia el pasado remoto de estrellas y otros objetos en el universo y el otro escudriña rocas volcánicas que podrían parecerse a las que algún día albergaron vida fuera de la Tierra. Entre los dos, trazan un mapa dual del universo: uno nace desde dentro. El otro, se extiende hacia fuera.

En tiempos de big data, inteligencia artificial y misiones interplanetarias, no es habitual que científicos tan reputados hablen del cielo con el tono de quien contempla un poema. Sin embargo, en las entrevistas con Marcaide y Martínez Frías, emerge con claridad que el impulso primero no es técnico, sino emocional.

«La exploración espacial  
es un motor de progreso»

**Jesús Martínez Frías**

«De día, el azul me parece una maravilla; de noche, si se ven las estrellas, veo belleza», dice Marcaide, dejando entrever que su vocación nace del asombro, no del cálculo. Algo similar sostiene Martínez Frías, aunque con una mirada más transversal: «El cielo tiene una componente estética que nos conmueve... Tal vez, son sentimientos y sensaciones ancestrales que se han perpetuado y que aún continúan vigentes empujándonos a explorar y a sentir».

En esta comunión entre belleza y curiosidad, ambos parecen coincidir en que mirar al cielo es también mirar hacia adentro. Una experiencia que, antes que científica, es profundamente humana.

Cuando se les pregunta por los descubrimientos más fascinantes de los últimos años en sus respectivos campos, tanto Jesús Martínez Frías como Jon Marcaide eligen

avances que no solo revelan nuevas capas del conocimiento científico, sino que abren horizontes epistemológicos completamente nuevos.

Para Martínez Frías, uno de los mayores hitos ha llegado desde el estudio de los meteoritos y la materia extraterrestre que ayudan a conceptualizar el origen de la vida. «El descubrimiento de las bases nitrogenadas en tres condritas carbonáceas y en el asteroide Bennu nos acerca cada vez más a los postulados conceptuales de la panspermia y a comprender mejor los principios del origen de la vida», afirma. La panspermia, hipótesis que sugiere que la vida podría haber llegado a la Tierra desde el espacio, ha dejado de ser ciencia ficción para anclarse en datos empíricos.

Además, subraya el papel de la geología y la geodinámica planetarias en la comprensión de las condiciones de habitabilidad de planetas como Marte o lunas como Titán o Encélado. «Nos ayudan a comprender su evolución paleoambiental y sus condiciones de habitabilidad», puntualiza.

«La exploración del universo siempre ha ido de la mano de avances tecnológicos»

**Jon Marcaide**

En el otro extremo del espectro de investigación, Jon Marcaide hace valer su experiencia en la observación de objetos celestes combinando un gran número de radiotelescopios

repartidos por la faz de la tierra (una técnica llamada interferometría de muy larga base) que permite entrar en contacto con lo intangible mediante la escucha de una sinfonía de ondas detectable a través de grandes receptores de radio.

«La detección de las ondas gravitatorias o gravitacionales» ha sido el hito más significativo para Marcaide. No solo por su impacto científico, sino por su alcance metodológico. «Representan una nueva ventana (fuera del espectro electromagnético) para explorar el universo», explica. Es una revolución equivalente a pasar de ver el universo con los ojos a escucharlo con un oído nuevo. Y añade: «A los líderes del proyecto les valió el Premio Nobel», prueba inequívoca del alcance de un descubrimiento que nos permite «escuchar» las coalescencias (fusiones violentas) de agujeros negros o estrellas de neutrones por la distorsión que causan del espacio, que en forma de ondas se desplaza hasta nosotros.

Ambos hallazgos —uno relacionado con el origen de la vida, el otro con el origen de las distorsiones del espacio— dan cuenta de que el cosmos aún tiene mucho que decir. Lo fundamental es estar preparados para escuchar y entender lo inesperado.

La idea de que la astronomía o la geología planetaria son disciplinas lejanas a la sociedad es, para Martínez Frías, una ilusión. «La exploración espacial es un motor de progreso», afirma. Y detalla: «Impregna nuestro día: GPS, transacciones económicas, BIZUM, monitorización de riesgos naturales y búsqueda de agua y recursos minerales gracias a los satélites».

Y va más allá. «Afecta al progreso de nuestro conocimiento científico de lo que nos rodea, ampliando nuestro contexto

### **Aplicaciones de la tecnología espacial.**

La exploración espacial ha traído consigo tecnologías que mejoran nuestro día a día.

Geolocalización.  
Transacciones.  
Monitorización de riesgos naturales.  
Búsqueda de agua y minerales.

vital y promoviendo un cambio de paradigma sociocultural a nivel planetario». Para él, observar otros mundos es también una forma de entender mejor el nuestro. Marcaide coincide: «La exploración del universo siempre ha ido de la mano de avances tecnológicos», y no solo para responder a preguntas abstractas. Subraya que «hoy es todavía más extremo. Físicos, ingenieros y astrónomos desarrollan juntos tecnología puntera, mucha de la cual se transfiere pronto a la vida civil».

## De Borges a Sagan.

---

Desde esa especie de extemporáneo tratado de cosmología que planteó Edgar Allan Poe en su ensayo 'Eureka' hasta la astronomía sin telescopio que tan brillantemente narró Jorge Luis Borges en numerosos cuentos y ensayos, la literatura y la filosofía son materias que apasionan a ambos científicos a los que no resulta difícil imaginar en un imposible debate entre los dos literatos y otro de sus grandes referentes, el considerado padre de la divulgación del cosmos, Carl Sagan.

No en vano, fuera del laboratorio, ambos han sentido la necesidad de explorar el universo más allá del lenguaje académico construyendo puentes entre la investigación y la imaginación, entre la ciencia y la fascinación.

Además de tratar de impulsar vocaciones científicas en conferencias y publicaciones con enfoque educativo, Martínez Frías ha escrito varios libros de «ficción científica», ambientados en el año 2100, que le permiten explorar futuros plausibles. «Me permiten libertades que serían impensables en cualquier artículo científico», explica.

Marcaide, por su parte, comenzó a escribir por un impulso mucho más doméstico. «Escribí hacia 1990 durante un fin de semana un librito para mis hijos cuando ellos tenían alrededor de diez años», recuerda.

El título, 'El gran viaje de los inkokerones', se convirtió en un pequeño fenómeno entre su entorno. En 2019, Espasa le

encargó un libro divulgativo que se gestó durante la pandemia y que explica, en modo de relato asequible, parte de los misterios del universo bajo el ilustrativo título de 'Últimas noticias del universo'.



---

**«HAY MUCHA POESÍA EN  
SABER CÓMO MUEREN  
LAS ESTRELLAS»**

**Jon Marcaide**

**«LA VIDA ES UNA  
CONSECUENCIA  
DE LA EVOLUCIÓN  
DEL UNIVERSO»**

**Jesús Martínez Frías**

## De los agujeros negros a las supernovas.

---

La imagen de un agujero negro puede parecer inquietante, pero para Jon Marcaide, lo que más pesa no es el misterio, sino el orgullo científico. «En 1982, como consecuencia de mi trabajo doctoral, publiqué la medición más precisa de la distancia angular entre dos cuásares», recuerda.

Aquel hallazgo sentó las bases de una línea pionera en astro-metría diferencial, donde su equipo mantuvo liderazgo internacional durante décadas. «Los estudios eran entre cuásares o núcleos activos de galaxias, pero a una resolución angular que todavía no permitía ver el agujero negro mismo», matiza.

Esa hazaña llegó años después, en 2019, cuando cuatro de sus discípulos formaron parte del equipo internacional que logró la primera imagen de un agujero negro. «Tengo razones para estar orgulloso de ellos», admite con satisfacción.

¿Debemos temerlos? Marcaide lo descarta de forma tajante: «No hay ninguno en el entorno cercano que nos pueda afectar». Y aclara: «Son negros porque solo absorben. No emiten radiación que podamos detectar, es su entorno el que emite». La famosa imagen de 2019 no captó el agujero en sí, sino el contraste con su entorno luminoso.

Pero los agujeros negros son solo una parte de su legado. Las supernovas han ocupado otra porción crucial de su trayectoria. «Las estrellas son como hornos donde se crean los elementos químicos a partir del hidrógeno y helio que se produjo al

comienzo del universo», explica. Y conecta directamente con nosotros: «Los productos generados en las estrellas corren por nuestra sangre y están en nuestros huesos».

En 1995, su equipo publicó en 'Nature' la primera descripción de la forma de corteza de la radioemisión de la supernova SN1993J. Ese mismo año, en 'Science', ofrecieron la primera imagen visual de su expansión. Luego, «estudiamos la expansión de la radio supernova de principio a fin, durante más de 15 años utilizando decenas de veces los mayores interferómetros intercontinentales». Fue un esfuerzo sin precedentes que «confirmó teorías nunca probadas sobre los mecanismos de explosión y encontró cosas nuevas interesantes».

«Los productos generados en las estrellas corren por nuestra sangre y están en nuestros huesos»

**Jon Marcaide**

Más recientemente, trabajó con el observatorio ALMA de Atacama en la supernova SN1987A. «Estos estudios proporcionaron la primera imagen tridimensional de los productos químicos formados en la cercanía del núcleo de la estrella que explotó», dice, reivindicando el valor de la tomografía estelar como nueva herramienta para comprender el fin de las estrellas.

Y cuando se le pregunta qué sentido tiene estudiar la muerte de un astro, responde con lucidez: «No sé si la pre-

gunta es correcta... porque la respuesta nihilista es que nada nos sirve de nada y podríamos prescindir de todo. Pero si hemos llegado a tener lo que tenemos ha sido porque hemos indagado en todas las direcciones del conocimiento, de las ciencias y las artes», explica, antes de dejar de nuevo suelto al escritor: «¡Qué diría un poeta como respuesta a esa pregunta! (...), hay mucha poesía en saber cómo mueren las estrellas».

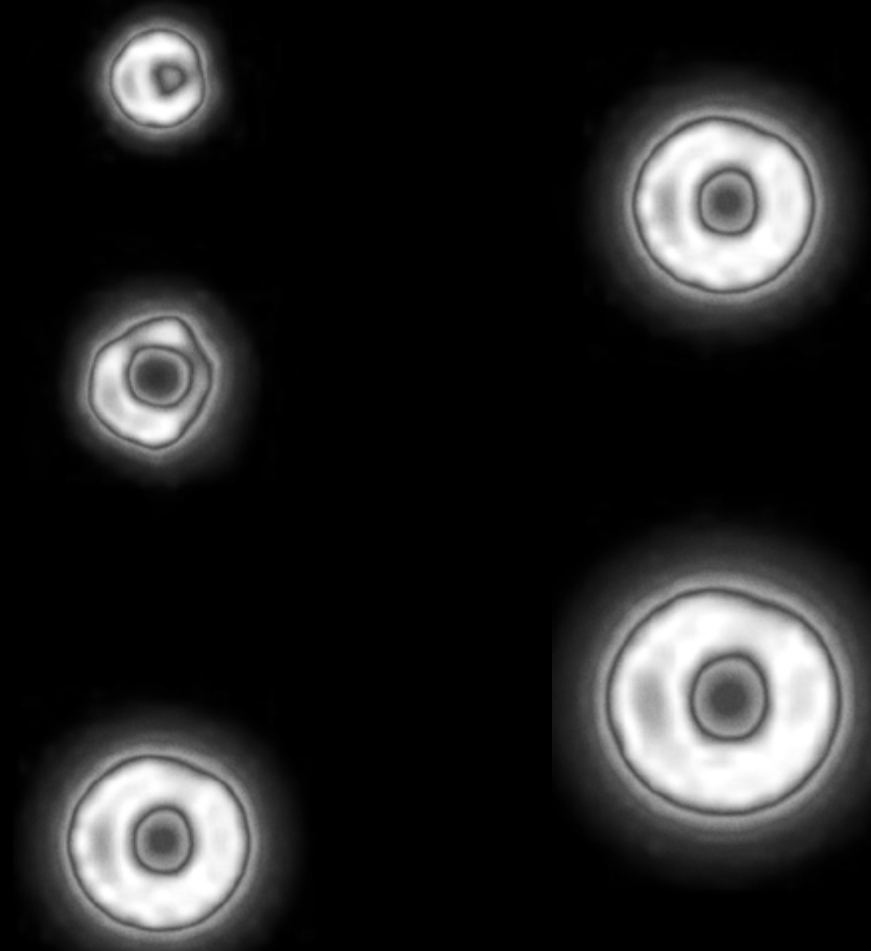
# SN1993J

## **Supernova.**

Así se llama la supernova cuya expansión captaron por primera vez en imagen Marcaide y su equipo.

Imágenes de la expansión de la radio de la supernova SN1993J captadas por el equipo de Jon Marcaide durante el primer año de los quince que registraron su evolución.

Imagen: Jon Marcaide.



Dos miembros del programa único de instrucción de astronautas ESA-PANGAEA simulan un paseo lunar en Lanzarote. Jesús Martínez Frías es uno de los instructores del programa.

Fotografía: ESA-A. Romeo.



«La exploración de la Luna es un vínculo de nuestro pasado y nuestro futuro»

**Jesús Martínez Frías**

Jesús Martínez Frías no estudia Marte desde la distancia, sino desde su geología. Lleva más de dos décadas participando como miembro de los equipos científicos de las misiones de la NASA, con un pie en el rover Curiosity y otro en Perseverance. «Explorar otro planeta es una experiencia única», asegura. Con Curiosity, trabajó en el sensor de temperatura del suelo de la estación REMS; con Perseverance, en el instrumento SuperCam, centrado en análisis espectroscópicos de minerales y rocas, capaces también de detectar compuestos orgánicos.

Las evidencias que ha contribuido a reunir sobre el pasado marciano son tan sólidas como sorprendentes: «Marte tuvo un pasado en cierto modo similar a la Tierra, con agua líquida en su superficie, escorrentía superficial, lagos, ríos, sistemas hidrotermales, mares e incluso tal vez un gigantesco océano en su hemisferio norte», enumera. También detalla que su atmósfera estaba enriquecida con vapor de agua y otros volátiles, lo que refuerza la idea de que «las condiciones de habitabilidad eran mucho más favorables que las

actuales». Por eso, no es descabellado pensar que pudo albergar vida. «Sería extraordinario que en un mismo sistema solar la vida hubiera emergido en dos planetas», reflexiona.

Pero Marte no se estudia solo con telescopios, ni con astro móviles. También se experimenta desde la Tierra. Ahí entran los llamados «análogos terrestres»: lugares de nuestro planeta que reproducen, en parte, las condiciones de otros mundos. «Desde nuestro equipo de investigación, hemos sido pioneros a nivel internacional», afirma. Y menciona escenarios tan extremos como la Antártida, el Sáhara, Islandia, el desierto de Tatacoa en Colombia o el volcán Pichu Pichu en Perú.

España, y en particular Canarias, ocupa un lugar privilegiado en ese mapa planetario: «En Lanzarote desarrollamos desde 2016 un programa único de instrucción de astronautas (ESA-PANGAEA), cuyas rutas he diseñado y por las que ya se han formado unos 15 astronautas de Europa, Estados Unidos y Japón».

Ese conocimiento terrestre será crucial también para la próxima gran etapa de la exploración espacial: el programa internacional de exploración espacial Artemisa. Para Martínez Frías, «Artemisa es mucho más que una continuación del programa Apolo. La Luna es un objetivo táctico, pero Marte es un objetivo estratégico». Cree que estamos cerca de tener una base semipermanente en el polo sur lunar, que funcionaría como puente hacia una presencia humana más duradera en Marte. «La exploración de la Luna es muy importante desde distintos puntos de vista, una especie de vínculo de nuestro pasado « y nuestro futuro», concluye.

En la era de la IA y los avances tecnológicos, ambos esperan un desarrollo exponencial en astronomía que cambiará la forma en que vemos el cosmos. «La nueva instrumentación hará aquello para lo que está diseñada y mucho más. Descubrirá nuevas cosas impensables ahora, como siempre ha sucedido con nueva tecnología», asegura Marcaide.

El inventario impresiona: Europa está construyendo «el mayor telescopio del mundo, de casi 40 metros de diámetro. Una joya tecnológica». En paralelo operan observatorios infrarrojos espaciales como el James Webb, con un espejo de 6,5 metros de diámetro, y están por llegar instalaciones capaces de cartografiar miles de millones de galaxias. «Un observatorio va a rastrear el cielo cada tres o cuatro días para detectar supernovas y objetos variables a distancias asombrosas», explica. Se avecina no solo una nueva era de descubrimiento, sino una transformación profunda de la forma en que entendemos el cosmos.

«Un observatorio va a rastrear el cielo cada tres o cuatro días para detectar supernovas a distancias asombrosas»

**Jon Marcaide**

## ¿Estamos solos?

---

La astrobiología no busca solo signos de vida en otros planetas; también plantea preguntas profundas sobre la condición humana, el origen de la vida y los límites del conocimiento y Martínez Frías ha sido uno de los pioneros en este campo en España, con un papel destacado en la creación del Centro de Astrobiología. Lo tiene claro: «La línea de investigación más prometedora es la de los análogos lunares y planetarios, con todo lo que conlleva la exploración e investigación multitemática, geobiológica de ecosistemas extremos».

Pero lo más interesante es cómo concibe esta disciplina como una intersección de saberes. «En el ámbito astrobiológico de las futuras misiones tripuladas, la convergencia de disciplinas tan distantes como la geología planetaria, con la psicología, arquitectura, agricultura o la medicina espacial», es, según él, una de las claves para comprender las posibilidades reales de vida más allá de la Tierra y cómo podríamos adaptarnos a entornos radicalmente distintos.

En sus obras de ficción científica proyecta un futuro no tan lejano donde estas ideas se desarrollan con libertad creativa. «Me permiten libertades que serían impensables en cualquier artículo científico... son una forma de intentar hacer una crónica pronóstica del futuro cercano», comenta sobre unos relatos que, aunque se sitúan en el futuro están anclados en los desafíos del presente.

Cuando se le plantea directamente si cree que estamos solos en el universo, su respuesta es firme, aunque cautelosa: «Estoy convencido de que la vida es una consecuencia de la evolución del universo». Y razona: «Si las condiciones son similares a las de la Tierra, la vida podría haber emergido y evolucionado, tal vez de manera diferente, pero no es inusitado inferir que así podría haber ocurrido a años luz de nuestro planeta».

«Confío en la capacidad humana de superación de límites y fronteras a todos los niveles»

**Jesús Martínez Frías**

Advierte, sin embargo, contra el sesgo antropocéntrico de muchas afirmaciones tajantes: «Algunos dicen que estamos solos, otros que estamos lejos. Pero son conceptos muy antropocéntricos», y concluye con una mirada larga hacia el futuro de la especie: «Confío en la capacidad humana de superación de límites y fronteras a todos los niveles. Si existe vida extraterrestre, estoy convencido de que la encontraremos, tal vez, mucho antes de lo que esperamos».

En este camino hacia la conquista del espacio, sorprende la visión humanista que plantea Martínez Frías. Más allá de la hazaña tecnológica o científica, plantea que se trata de un asunto cultural, político, filosófico y, por lo tanto, también

ético. «La geoética y astrobioética son cruciales para el futuro de cualquier investigación espacial». En un momento en el que se proyectan bases lunares, misiones a Marte y minería de asteroides, su advertencia suena urgente: «La ética es la columna vertebral de todo estudio científico».

Frías propone que estos principios no se limiten a los comités o protocolos técnicos, sino que estén presentes «desde la educación básica hasta los protocolos de buenas prácticas más sofisticados». Lo que está en juego no es solo el cómo, sino el para qué. Por eso insiste en una comunicación clara y directa con la sociedad: «Es primordial que exista una buena comunicación ciencia-sociedad acerca de la naturaleza poliédrica de la exploración del cosmos».

Y, de algún modo, ahí convergen las dos voces. Marcaide no habla explícitamente de ética, pero en su mirada hay una defensa de la curiosidad como motor civilizatorio. Cuando le preguntan para qué sirve estudiar la muerte de las estrellas, responde: «Si hemos llegado a tener lo que tenemos ha sido porque hemos indagado en todas las direcciones del conocimiento, de las ciencias y las artes». La suya es también una reivindicación de la ciencia como cultura.

Ambos, desde puntos distintos del conocimiento— uno más técnico, otro más geobiológico—coinciden en algo esencial: que mirar al cielo no nos aleja de la Tierra, sino que nos conecta con ella de forma más profunda. Explorar el cosmos es, en el fondo, una forma de explorarnos a nosotros mismos.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### BLOQUE II

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### BLOQUE III

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# ENERGÍA SOSTENIBLE

## Juego limpio

Energía sostenible para un consumo que respete el entorno.  
**Hermenegildo García e Inmaculada Ortiz.**





**Hermenegildo García**



**Inmaculada Ortiz**

## PRÓLOGO

## MUY HUMANOS

### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

## AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Hermenegildo García

**Canals, 1 de junio de 1957**

**Ingreso en la RAC: 26 de febrero de 2025**

Hermenegildo García es doctor en Ciencias Químicas por la Universitat de València, catedrático de Química Orgánica en la Universitat Politècnica de València y miembro fundador del Instituto de Tecnología Química (ITQ, UPV-CSIC). Especialista internacional en fotoquímica y catálisis para la conversión de luz solar y captura de CO<sub>2</sub>, lidera investigaciones sobre fotocatalizadores, carbocatálisis con grafeno y generación de combustibles renovables.

Ha publicado más de novecientos cincuenta artículos de alto impacto, dirigido treinta y una tesis doctorales y registrado múltiples patentes.

Ha recibido numerosos galardones: Premio Rey Jaime I en Nuevas Tecnologías (2016), Premio Nacional de Investigación Enrique Moles (2021), Medalla de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España (2023), y una ERC Advanced Grant (2024) para proyectos punteros en descarbonización. Es Fellow de la Royal Society of Chemistry, Doctor Honoris Causa por la Universidad de Bucarest y profesor honorario internacional.

Presidió la Real Sociedad Española de Química (2006–2012), codirige el ITQ, y participa en comités científicos europeos como panel PE4 de los ERC Consolidator Grants. Su labor ha colocado al ITQ y a España en la vanguardia de la catálisis solar y la química sostenible.

**Saber más**

Personal y transferible.

**Rincón favorito de Canals.**

La casa paterna, de la que tengo muy buenos recuerdos. Pero el lugar icónico es la plaza de la Iglesia con la hoguera de San Antonio plantada y lista para su quema.

**¿Una fórmula para gestionar el estrés?**

Afortunadamente, soporto bien el estrés. Mi fórmula es trabajar más.

Invento favorito de la ciencia.

El ordenador e internet. Como digo, mi trabajo consiste en intentar llenar un disco duro con información de los resultados científicos del grupo.

**Un miedo.**

De momento, no tengo.

**Persona que más le inspira.**

Mi mujer.

**Una comida.**

Una buena paella con buen vino y amigos.

**¿Una máxima?**

Busca algo que te apasione y hazlo.

**Una tecnología.**

No podría vivir sin ordenador.

**El mayor reto de su carrera profesional, hasta la fecha.**

Conseguir aplicar a gran escala los resultados obtenidos en el laboratorio.

**Pasatiempo favorito.**

No he tenido tiempo para pasatiempos. Si lo tuviese, sería leer.

**Un sueño con el ITQ.**

Que siga siendo fiel a sus orígenes y continúe siendo un centro de referencia en su campo, favoreciendo el progreso de la gente joven y el entorno.

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### **BLOQUE II**

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### **BLOQUE III**

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### **AYER Y MAÑANA**

## **EPÍLOGO**

# Inmaculada Ortiz

**8 de diciembre de 1958**

**Ingreso en la RAC: 23 de febrero de 2022**

Inmaculada Ortiz es doctora en Ciencias Químicas por la Universidad del País Vasco, catedrática de Ingeniería Química en la Universidad de Cantabria y miembro correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España (2022).

Su investigación se centra en la ciencia y tecnología de membranas aplicadas a la protección medio ambiental, como el tratamiento de aguas contaminadas, la recuperación de metales o la regeneración de agua. Realizó estancias posdoctorales en Alemania y Reino Unido, donde inició su especialización en membranas selectivas.

Desde 1996 dirige en Cantabria el grupo Procesos Avanzados de Separación, pionero en tecnologías como los contactores de fibra hueca. Ha liderado más de setenta proyectos de investigación y transferencia, incluyendo colaboraciones internacionales y con empresas. Es autora de más de ciento setenta publicaciones científicas y ha sido reconocida con premios como el Burdinola, el CIDETEC o el Juan María Parés.

Además, ha participado en comités científicos, editoriales y agencias de evaluación, y ha promovido la creación de la empresa de base tecnológica Apria Systems, impulsando la transferencia de conocimiento en el ámbito de la ingeniería química sostenible.

**Saber más**

Personal y transferible.

**Un elemento de la tabla periódica y por qué.**

Oxígeno. Imprescindible para la vida.

**Un viaje pendiente.**

Antártida.

**Qué le devuelve la energía.**

El sol.

**¿Una máxima?**

Investigar es buscar respuestas, pero también aprender a hacer mejores preguntas.

**Una esperanza.**

Trasladar el dinero invertido en defensa a mejorar la calidad de vida de las personas y del planeta.

**Un postre.**

Con chocolate.

**Momento favorito del día.**

Amanecer.

**Inventor/a favorito/a de la ciencia.**

Marie Curie-Slodowska.

**Logro de su carrera profesional del que se siente más plena, hasta la fecha.**

Haber contribuido a formar a cincuenta y cinco doctores.

**Lo primero que viene a su mente cuando lee la palabra «mar».**

Recurso infinito.

**Un sueño con su grupo de investigación en Procesos Avanzados de Separación.**

Habitando viviendas verdes y sostenibles.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### BLOQUE II

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### BLOQUE III

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Tecnologías químicas que cambian el agua, el aire y la energía.

## Química aplicada para una industria sostenible.

En un momento clave para la descarbonización, dos referentes de la química aplicada en España, Hermenegildo García e Inmaculada Ortiz, comparten cómo sus investigaciones en catálisis avanzada y tecnologías de separación están contribuyendo a resolver retos industriales tan esenciales como la reutilización del agua, la captura de CO<sub>2</sub> o la producción de hidrógeno verde. Sus proyectos combinan ciencia puntera y transferencia efectiva, marcando el camino hacia una industria más limpia y conectada con el conocimiento.

Desde la descontaminación atmosférica hasta la autosuficiencia energética doméstica con hidrógeno verde, pasando por la recuperación de metales pesados o la captura de CO<sub>2</sub>, la ciencia química trabaja —con avances tan silenciosos como cruciales— para traducir conocimiento en soluciones industriales sostenibles. Desde dos costas tan diferentes como complementarias, la mediterránea y la cantábrica, Hermenegildo García e Inmaculada Ortiz, dos de los investi-

gadores químicos más influyentes en catálisis y tecnologías de separación, reflexionan sobre los desafíos y las oportunidades de una ciencia que no busca solo entender el mundo, sino mejorarlo.

«Salir al mundo real nos conecta con las necesidades del sector productivo»

**Inmaculada Ortiz**

Y una forma de hacerlo es mediante la transferencia de conocimiento, esa bisagra entre laboratorio y mercado que, aunque avanza, todavía no lo hace al paso deseado. «Se ha avanzado muy ligeramente», resume Hermenegildo García. «Desde el punto de vista de la investigación, esta transferencia se valora poco comparada con otros méritos curriculares. Desde el punto de vista de las empresas, la mayoría de las pequeñas y medianas no innovan si no hay fondos públicos que lo financien mientras que una parte de la innovación de las grandes depende también, al menos parcialmente, de los fondos públicos».

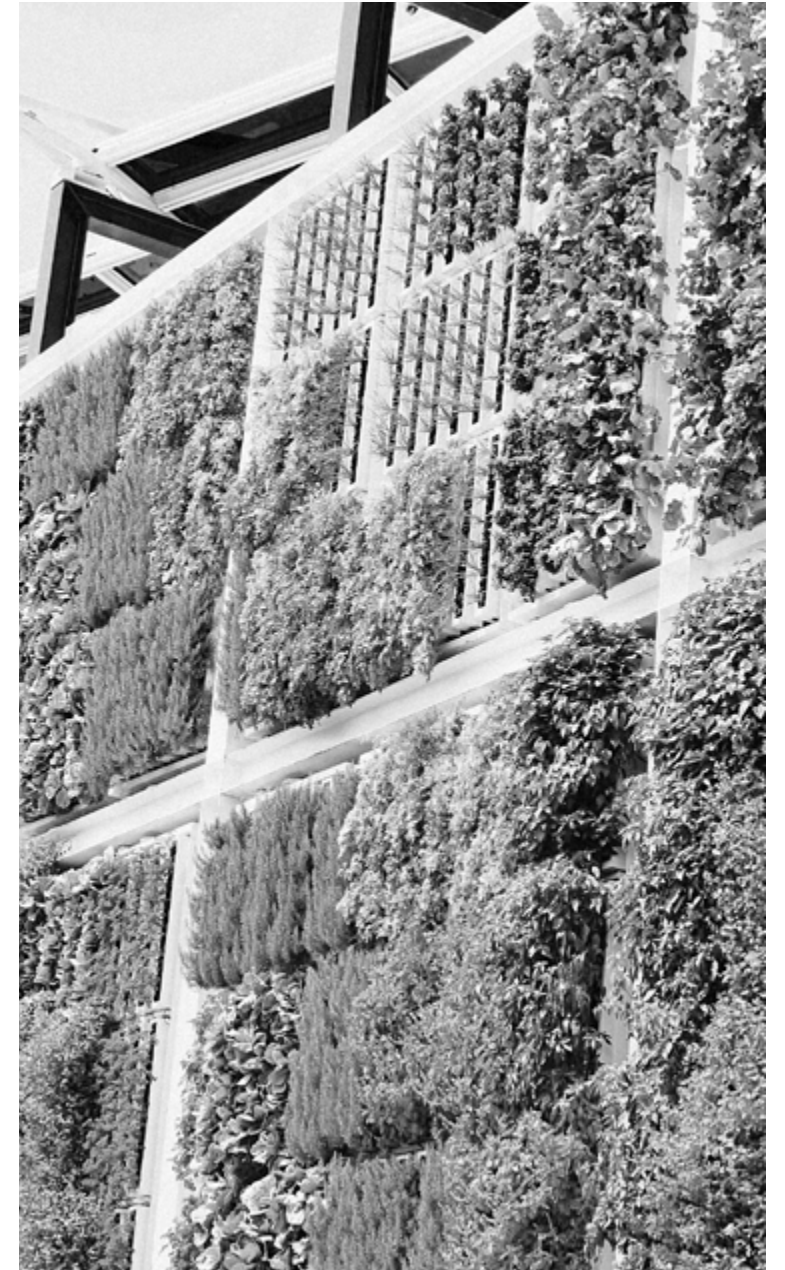
Inmaculada Ortiz coincide en lo esencial, aunque destaca una evolución positiva: «Hace cuatro décadas la conexión entre los centros de investigación públicos y el sector productivo era testimonial. Desde entonces se ha producido una mejora continuada. Se ha ido generando un marco de confianza en el que la incorporación de doctores juega un

papel fundamental». Aun así, ambos miran con cierta envidia los modelos anglosajones y del norte de Europa, donde buena parte de la financiación de los centros de investigación proviene del sector privado y de multinacionales.

Ambos investigadores destacan la importancia «de salir de la academia para conectar con las necesidades reales del entorno productivo. «Salir de la zona de confort al mundo real es un camino de doble dirección», afirma Ortiz. «No solo favorece la transferencia del conocimiento que generamos, sino que nos conecta con las necesidades reales del sector productivo, que muchas veces reorientan nuestras propias líneas de investigación».

«Las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducirán drásticamente en una década. Aun así, habrá que capturarlo. Tendrá un valor, en vez de ser un desecho»

**Hermenegildo García**



---

**«LA CIENCIA  
NO PUEDE QUEDARSE  
EN LOS ‘PAPERS’»**

Hermenegildo García

**«FOMENTAR  
LA TRANSICIÓN  
ENERGÉTICA  
Y LA ECONOMÍA  
CIRCULAR ES  
IMPRESINDIBLE»**

Inmaculada Ortiz

## Catalizar y separar para cambiar el mundo.

---

Las tecnologías que los dos científicos investigan están transformando sectores enteros.

La catálisis ha dibujado una especie de atajo en la carrera química. El proceso que permite acelerar una reacción química sin que el catalizador se consuma nos permite hoy transformar más rápido y con menos gasto energético.

Un ejemplo cotidiano y fácil de entender está en el convertidor catalítico de los coches, que reduce de forma drástica la contaminación del aire. Este dispositivo transforma gases tóxicos generados por la combustión —como el monóxido de carbono o los óxidos de nitrógeno— en compuestos menos nocivos. Así, la catálisis se revela como una herramienta esencial para desarrollar procesos más limpios, eficientes y sostenibles, ya que permite transformar

materias primas o residuos en productos útiles con un menor impacto ambiental y energético.

Por su parte, las tecnologías de separación permiten aislar o purificar los componentes útiles dentro de una mezcla. Un ejemplo cercano es el filtro de una jarra purificadora de agua, que retiene impurezas y deja pasar solo el agua limpia.

Ese mismo principio, aplicado con alta tecnología, permite separar el agua del mar de la sal para hacerla potable, recuperar metales valiosos de residuos industriales o capturar el CO<sub>2</sub> para evitar su emisión a la atmósfera.

Son, en definitiva, procesos que mejoran la eficiencia, reducen el consumo de recursos y permiten cerrar ciclos en sectores clave como el del agua, la energía o la industria química.

García señala que la catálisis está experimentando «un cambio profundo» con la irrupción de la electrocatálisis, la fotocatalisis y otras formas de promover reacciones químicas mediante energías limpias y a temperatura ambiente. Esta nueva catálisis permitirá prescindir del calor como fuente principal de activación química y reducir las emisiones.

«Las emisiones de CO<sub>2</sub> se reducirán drásticamente en una década debido al cambio de combustibles fósiles a renovables con baja huella de carbono. Aun así, habrá que capturar CO<sub>2</sub> en determinados procesos, como la producción de cemento. El CO<sub>2</sub> tendrá un valor, en vez de ser un desecho. Para ello, habrá que implementar materiales con una alta capacidad de adsorción de CO<sub>2</sub> para su captura y que lo liberen con bajo coste de energía para su uso o almacenamiento. El coste de esos materiales y el proceso de captura y utilización será cubierto por el valor de los productos obtenidos y los incentivos».

### Aplicaciones de la química.

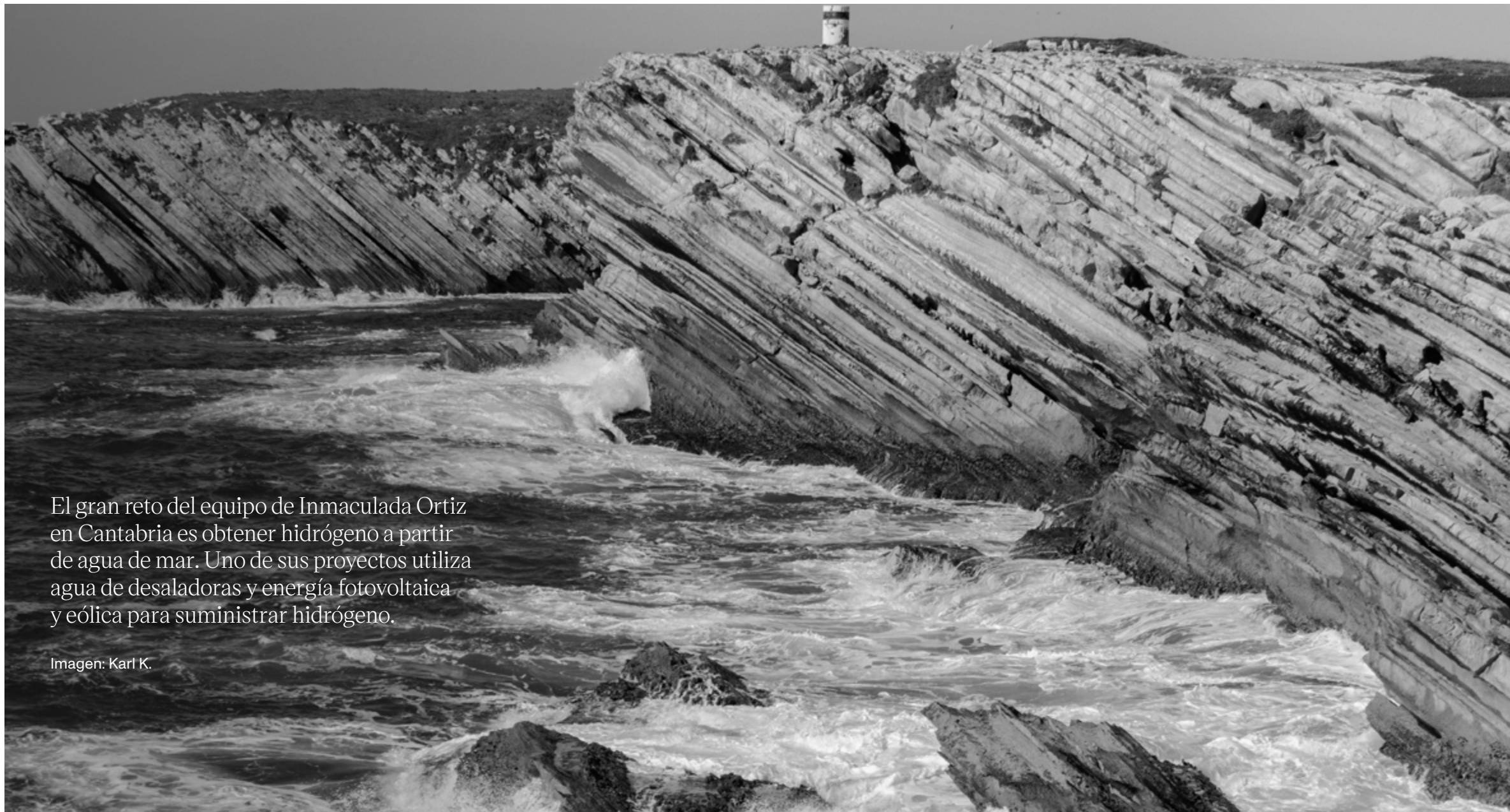
Tecnologías químicas como la catálisis y la separación tienen aplicaciones cotidianas para un entorno más limpio.

Potabilización del agua de mar.  
Filtrado y purificación de agua.  
Captura CO<sub>2</sub>.  
Transformación de gases tóxicos.

Uno de los sueños del equipo de Hermenegildo García en Valencia es generar hidrógeno utilizando la luz del sol. En Japón, ya se ha hecho una prueba piloto con éxito mediante un fotocatalizador especial.

Imagen: Azharul Islam.





El gran reto del equipo de Inmaculada Ortiz en Cantabria es obtener hidrógeno a partir de agua de mar. Uno de sus proyectos utiliza agua de desaladoras y energía fotovoltaica y eólica para suministrar hidrógeno.

Imagen: Karl K.

## Del agua al hidrógeno, ciencia contra la escasez.

Ortiz destaca que la tecnología de membranas ofrece ya «un gran abanico de alternativas con aplicaciones multisectoriales», y está llamada a jugar un papel decisivo en la consecución del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 6: «Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todos». Estas tecnologías permiten desde la desalación eficiente hasta la reutilización segura de aguas residuales o la obtención de agua potable en contextos extremos mediante ósmosis directa.

Pero sus aplicaciones no terminan ahí. Ortiz subraya también su utilidad en la separación eficiente del CO<sub>2</sub> para facilitar su captura y transformación, o en la recuperación de metales valiosos como zinc, hierro o cromo a partir de corrientes residuales industriales, con impacto directo en sectores como el galvanizado o la metalurgia.

Uno de los grandes desafíos de ambas líneas de investigación es la relación agua-hidrógeno. «Para una tonelada de hidrógeno hacen falta nueve de agua pura», advierte García. Esa desproporción revela una tensión creciente entre consumo humano y generación energética, sobre todo en contextos de escasez hídrica. «Los electrolizadores actuales requieren agua ultrapura y electrolitos disueltos», explica. Aunque las membranas pueden purificar el agua del mar hasta alcanzar esa calidad, «en el futuro deberán desarrollar-

# 9.000

### **Kilos de agua pura.**

Cantidad de agua pura que se necesita para extraer 1.000 kilos de hidrógeno.

se electrolizadores capaces de trabajar con agua marina».

Ese mismo reto aborda Ortiz en un estudio sobre la descarbonización industrial en zonas con recursos limitados. Su proyecto diseña una cadena de suministro de hidrógeno optimizada que combina fotovoltaica con agua excedente de desaladoras para alimentar electrolizadores y transportar el hidrógeno a centros industriales.

«El estudio considera la disponibilidad estacional y territorial de la energía solar y eólica y determina los emplazamientos óptimos para granjas solares y parques eólicos», explica. Según los modelos hasta 2050, casi la mitad del coste del sistema corresponde a esas instalaciones, pero su implementación genera beneficios ambientales y económicos sostenibles a largo plazo.

Por su parte, García investiga materiales como el grafeno o ciertas nanopartículas para catalizar la producción de hidrógeno de forma más eficiente. El grafeno —una capa de átomos de carbono con estructura de panal— destaca por su ligereza, resistencia y capacidad de conducción eléctrica, siendo un excelente semiconductor. «Nuestra contribución fue demostrar que esos nanomateriales pueden absorber luz visible y ultravioleta y generar hidrógeno a partir del agua con una eficiencia atómica muy alta», afirma.

Ortiz también trabaja en la integración de procesos que regeneran agua y generan energía. Es el caso del proyecto europeo LIFE 3E, que construye una planta piloto en la EDAR costera de Comillas (Cantabria) para demostrar la viabilidad de un sistema que reutiliza aguas residuales

mientras produce energía azul. Esta energía se extrae del gradiente salino entre el agua del mar y el agua depurada mediante electrodiálisis inversa (EDR).

El proyecto, coordinado por la empresa pública MARE, cuenta con la participación de la Universidad de Cantabria, la Universidad de Darmstadt, el CIMA y una consultora formada por la propia Ortiz. Es la primera instalación de este tipo a nivel mundial, y busca demostrar que es posible reducir el consumo energético del tratamiento de aguas, bajar las emisiones y avanzar hacia un modelo más circular, especialmente útil en zonas costeras con presión sobre los ecosistemas marinos.

## La sostenibilidad como principio rector.

---

La sostenibilidad no es solo una línea de investigación, sino un principio organizador. Para Ortiz, «fomentar la transición energética, aumentar la eficiencia de los procesos y evolucionar hacia una economía circular son medidas imprescindibles». García insiste en que «los procesos sostenibles son los únicos que a largo plazo se pueden mantener en el único planeta que tenemos». En este contexto, la valorización del CO<sub>2</sub>, su captura y transformación en productos útiles, será clave en sectores difíciles de descarbonizar, como el cemento.

Ortiz ha desarrollado, junto a un grupo de ingeniería telemática, el gemelo digital de su planta energética doméstica, una herramienta que permite predecir y controlar el comportamiento del sistema. «La metodología que estamos desarrollando creemos que es trasladable a otras aplicaciones siempre que se disponga de la suficiente cantidad de datos». Estas herramientas digitales se combinan con modelos fenomenológicos y técnicas de optimización basadas en balances de propiedad, con criterios económicos y ambientales para la toma de decisiones.

«Transformar conocimiento especializado en productos y servicios de valor es fundamental»

**Inmaculada Ortiz**

El recorrido de Ortiz incluye además una historia singular de emprendimiento. En 2006 cofundó Apria Systems, una ‘spin-off’ nacida sin ayudas externas y centrada en tecnologías de membrana, electroquímicas y de oxidación que es la que aplica las nuevas tecnologías al proyecto LIFE 3E. «El proceso en sus inicios afrontó importantes dificultades porque no contamos con ninguna ayuda externa; la financiación procedía de créditos bancarios», recuerda. Hoy, la empresa cuenta con dieciocho empleados y exporta sus soluciones. En su opinión, las ‘spin-off’ son un eslabón clave en el ecosistema de transferencia tecnológica. «Tener la capacidad de transformar conocimiento especializado en productos y servicios de valor es fundamental», afirma.

A la hora de hablar del futuro, ambos tienen claro que el hidrógeno jugará un papel decisivo. «Un hito será, sin duda, la implementación masiva de electrolizadores para generar hidrógeno y su consumo en transporte», apunta García. Ortiz, por su parte, espera con ilusión el resultado de las investigaciones de su colega para aplicarlas en distintos trabajos. También destaca el papel que puede jugar el desarrollo de microfactorías en aplicaciones tan fascinantes como la recuperación de materiales críticos.

García advierte sobre las desigualdades en financiación y competitividad entre países y lo hace con un símil irrefutable: «Solo la Universidad de Harvard tiene un presupuesto comparable al de todo el sistema de financiación de la ciencia español», señala. Al mismo tiempo, destaca la irrupción de China como superpotencia en química.

En ese contexto global, subraya, la perseverancia y la calidad humana siguen siendo clave: «Ramón y Cajal dijo que el factor humano es el principal (de momento) para llevar a cabo investigación científica de calidad».

Y en ese sentido, comparten no solo la visión de la calidad de los científicos españoles a los que representan en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España sino también una certeza que Hermenegildo García formula sin rodeos: «La ciencia no puede quedarse en los 'papers'».

La vinculación entre empresas y ciencia abrirá vías de desarrollo recíprocas y ayudará a avanzar hacia una economía descarbonizada y circular, en la que la química tiene mucho más que decir. Y estos dos científicos, mucho que aportar.



«Los procesos sostenibles  
son los únicos que a largo plazo  
se pueden mantener»

**Hermenegildo García**

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### **BLOQUE II**

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### **BLOQUE III**

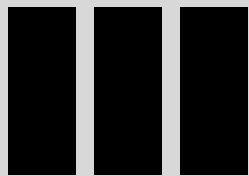
Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### **AYER Y MAÑANA**

## **EPÍLOGO**



### Bloque III

# SOMOS PARTE DE LO MISMO

Ciencias naturales para cuidar a la humanidad y al planeta.



**PRÓLOGO**

**MUY HUMANOS**

**BLOQUE I**

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

**BLOQUE II**

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

**BLOQUE III**

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

**AYER Y MAÑANA**

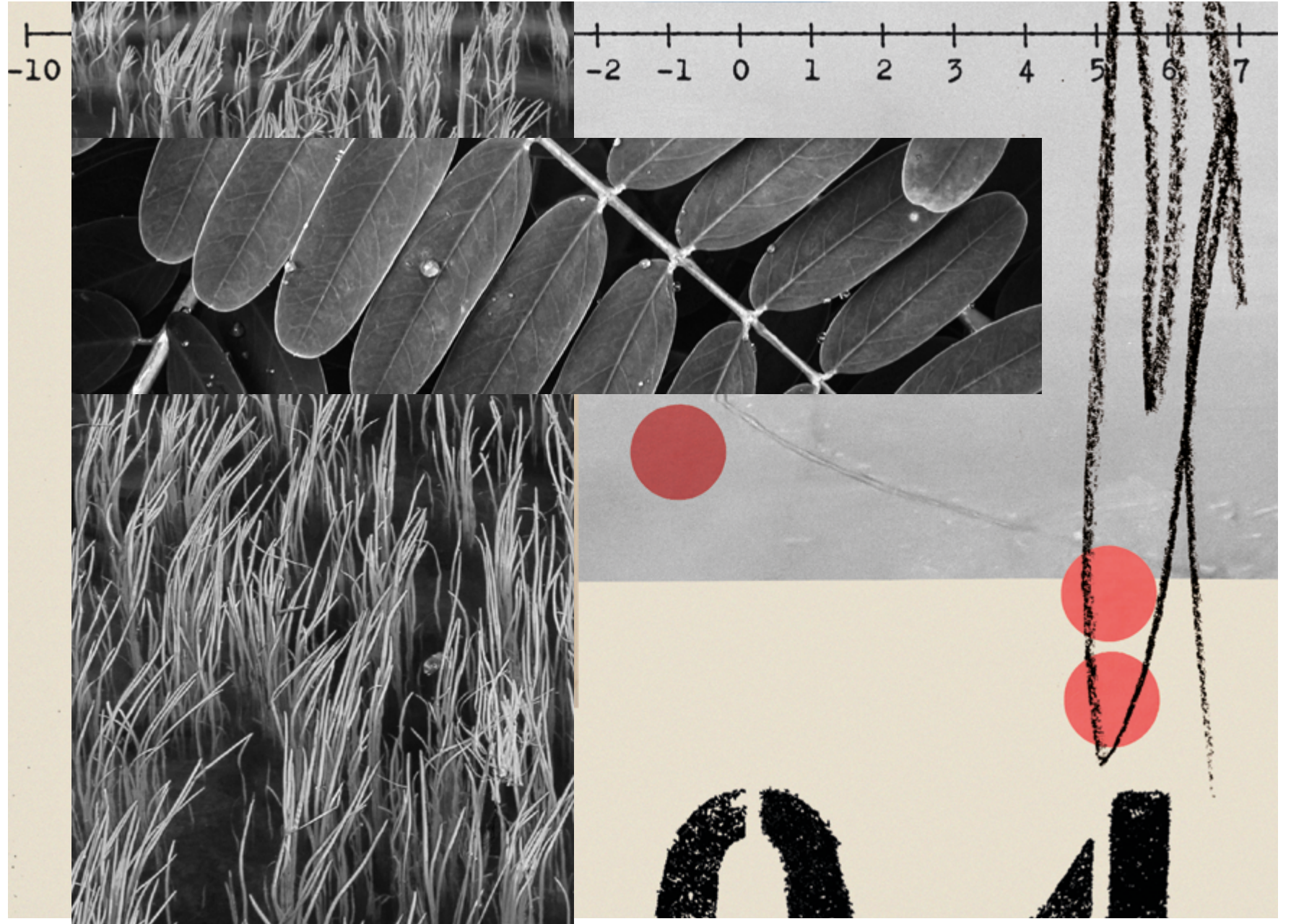
**EPÍLOGO**

# SOSTENIBILIDAD Y BIODIVERSIDAD

Doñana y el buen vivir

El camino hacia un progreso sostenible.

Miguel Delibes de Castro y Pedro Jordano.





**Miguel Delibes de Castro**



**Pedro Jordano**

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Miguel Delibes de Castro

**Valladolid, 12 de febrero de 1947**

**Ingreso en la RAC: 28 de mayo de 2014**

Miguel Delibes de Castro es doctor en Ciencias Biológicas por la Universidad Complutense de Madrid y profesor de investigación del CSIC.

Ha desarrollado la mayor parte de su carrera en la Estación Biológica de Doñana, institución que dirigió y desde la que impulsó investigaciones pioneras en conservación de fauna, especialmente del lince ibérico, convirtiéndose en una figura clave en la biología de la conservación en Europa. Ha dirigido dieciocho tesis doctorales y seis tesinas y es autor de más de ciento noventa artículos científicos.

Fue presidente fundador de la Sociedad Española para la Conservación y Estudio de los Mamíferos (SECEM) y ha asesorado a organismos nacionales e internacionales.

Ha recibido múltiples distinciones, como el Premio Nacional Félix Rodríguez de la Fuente, el Premio a la Conservación de WWF Internacional, el Premio Rey Jaime I de Protección del Medio Ambiente y la Medalla al Mérito Medioambiental de Andalucía.

Además de su labor científica, ha contribuido a la sensibilización pública sobre los desafíos ecológicos, destacando su obra divulgativa 'La tierra herida', escrita junto a su padre, el novelista Miguel Delibes.

## Saber más

Personal y transferible.

**Lo primero que piensa cuando lee la palabra «progreso».**

Recuperación del equilibrio con la naturaleza, a fin de evitar el colapso y posibilitar el bienestar de las futuras generaciones.

**Una comida.**

Los calabacines rellenos de mi hermana Elisa, con la receta de mi madre.

**Un remedio anti-estrés.**

Salir al campo, montar en bicicleta, pescar...

**¿Cuántas veces ha estado en Doñana?**

He vivido en el Palacio de Doñana durante años y no puedo ni estimar cuántas veces he estado allí luego.

**Un miedo.**

El dominio de la sinrazón, el mundo en el que serán adultos mis nietos.

**Un sueño.**

Un mundo más pausado, menos consumista, donde podamos ser felices con menos cosas.

**Persona que inspira sus días.**

Mi familia, incluyendo los que ya no están.

**¿Una máxima?**

Una frase de Antonio Gramsci: «Frente al pesimismo de la inteligencia, el optimismo de la voluntad».

**Cualidad que más aprecia en sus colegas de investigación.**

La sencillez, la generosidad, la capacidad de aceptar los errores y cambiar...

**Deporte favorito.**

Montar en bicicleta.

**¿Qué está leyendo?**

'Lejos de Egipto' de André Aciman, 'El bosque', de Anne Sverdrup-Thygeson y una selección de poemas de Ángel González.

**Una planta.**

El palmito ('Chamaerops humilis').

**Un consejo para una vida más sostenible.**

Reflexionar para intentar escapar de la trampa (maliciosamente urdida) de que necesitamos consumir más y comprar muchas cosas para ser felices.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Pedro Jordano

**Córdoba, 23 de julio de 1957**

**Ingreso en la RAC: 30 de octubre de 2024**

Pedro Jordano es doctor en Biología Vegetal y Ecología por la Universidad de Sevilla, profesor honorario en la misma institución y profesor de investigación en la Estación Biológica de Doñana (CSIC).

Su investigación se centra en la biodiversidad, abordando las interacciones ecológicas y evolutivas entre especies —como mutualismos, simbiosis o parasitismo— mediante el uso de redes ecológicas, genética molecular y modelos estadísticos, con aplicaciones clave en conservación.

Ha publicado más de 240 artículos científicos con más de 24.000 citas y ha dirigido 16 tesis doctorales y más de 20 investigaciones postdoctorales. Ha presidido el área de Ciencias y Tecnologías Ambientales del Plan Nacional de Investigación y ha ocupado cargos relevantes en el European Research Council, la European Science Foundation y en los premios BBVA Fronteras del Conocimiento.

Entre sus reconocimientos destacan el Premio Nacional de Investigación en Ciencias Ambientales (2018), el Premio Rey Jaime I (2014), el Mercer Award de la Ecological Society of America (2008) y el Premio Ecosistemas-Luis Balaguer a la trayectoria profesional (2018). También ha sido galardonado por la British Ecological Society.

**Saber más**

Personal y transferible.

**Rincón favorito de Córdoba.**

La mezquita-catedral, en la parte de la expansión de Al-Hakam II (s. X).

**Un color.**

Azul.

**Plato favorito.**

Salmorejo cordobés.

**Una planta.**

El cerezo de Santa Lucía ('Prunus mahaleb').

**Un animal.**

La curruca capirotada ('Sylvia atricapilla').

**Un recuerdo de la infancia.**

Excursiones por el valle del río Guadiato en Córdoba, observando aves.

**Inventor/a favorito/a de la ciencia.**

Charles Darwin.

**Su remedio antiestrés.**

Diseño y construyo modelos de LEGO, especialmente robots y naves espaciales.

**¿Un sueño pendiente?**

Viajar al espacio.

**Un miedo.**

Ninguno.

**Persona que inspira sus días.**

Mi esposa Myriam; mis hijos.

**¿Una máxima?**

Una de Confucio: «Trata a los extranjeros con humanidad; lleva la ilustración a tus vecinos; imita al talento; deposita tu confianza en los hombres honrados, y rompe toda relación con los hombres corrompidos.»

**Cualidad más necesaria para convertirse en un buen investigador.**

La perseverancia.

**Una canción.**

'Blowing in the wind', de Bob Dylan.

**Su rincón favorito de Doñana.**

Imposible señalar uno solo. El Cerro de los Ánsares y- por razones personales- Hato Ratón.

**Una tecnología para navegar la complejidad de los ecosistemas.**

Sensores LIDAR 3D.

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### **BLOQUE II**

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### **BLOQUE III**

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### **AYER Y MAÑANA**

## **EPÍLOGO**

# Biodiversidad, ciencia y los umbrales del planeta.

La ciencia avisa,  
la naturaleza responde.

En tiempos de crisis ecológica, dos de las voces más autorizadas en el estudio de la biodiversidad, Miguel Delibes de Castro y Pedro Jordano, reflexionan sobre los límites del planeta, el verdadero significado del progreso y el papel irrenunciable de la ciencia y la democracia. Doñana, como laboratorio natural y símbolo de resistencia, centra parte de una conversación urgente, pero también esperanzadora: aún estamos a tiempo.

Cada invierno llegan menos ánsares comunes a Doñana. Las rutas migratorias de muchas especies de aves están cambiando, y con ellas también el equilibrio de los ecosistemas mediterráneos. «Los pequeños pájaros frugívoros como currucas o zorzales están desapareciendo de nuestras latitudes», alerta el biólogo Pedro Jordano. «Son nuestras jardineras del bosque. Sin ellas, la regeneración natural de la vegetación se frena».

Pero también hay señales alentadoras. Las ciencias de la

conservación han demostrado que, con voluntad social y conocimiento, es posible revertir procesos de deterioro. La recuperación del lince ibérico, especie emblemática en peligro de extinción, es un ejemplo paradigmático que Miguel Delibes conoce de cerca. La biodiversidad, aunque frágil, también es resiliente. Y la ciencia, bien acompañada, es una herramienta fundamental para su defensa y conservación.

«El desafío es aplicar la tecnología al servicio de la sostenibilidad»

**Miguel Delibes de Castro**

En paralelo, el concepto mismo de «progreso» comienza a mutar. Para algunos, sigue ligado a la extracción de nuevos recursos. Para otros, como Delibes, la verdadera innovación es otra: «Destruir el capital natural para generar capital financiero a corto plazo no nos hace más ricos, sino al revés». En su visión, aprender a vivir con menos, sin sobrepasar los límites del planeta, es la forma más civilizada de prosperar.

La ciencia ha dejado claro que el planeta tiene límites. No se trata solo de un discurso ambientalista, sino de un diagnóstico con evidencia empírica. «El progreso basado en la ciencia implica avances en el bienestar humano, y entre ellos se encuentra preservar un medio ambiente con su funcionalidad completa», sostiene Jordano. «Pero rara vez se valora el coste ambiental que conlleva este progreso».

Los dos entrevistados, que además de un sillón en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España comparten una pasión vocacional por la ecología, coinciden en que no se trata de renunciar al bienestar, sino de reinventarlo. El desarrollo tecnológico puede ser una herramienta clave, pero siempre que se integre en un marco de uso racional de los recursos. «Hoy la ciencia nos dice que el camino de explotar más y más recursos utilizando cantidades crecientes de energía está cerrado», insiste Delibes. «Por eso, el desafío es aplicar la tecnología al servicio de la sostenibilidad».

En este marco, la educación y la cultura ambiental se convierten en pilares imprescindibles. Por eso, Jordano subraya la necesidad de revisar algunos de los fundamentos de un sistema económico que ha sido profundamente extractivo. «Nuestra relación con la naturaleza es muy asimétrica: obtenemos mucho y devolvemos muy poco. Eso la degrada, y también nos degrada como sociedad».

Desde la extinción masiva de especies hasta la pérdida de fertilidad del suelo, los signos de alerta se multiplican. «Se estima que hay en el mundo un millón de especies amenazadas con la desaparición», indica Delibes.

«Las cosechas bajan sus rendimientos por falta de polinizadores, los caladeros se agotan, las plagas aumentan». El colapso ecológico no es una amenaza lejana, sino una trayectoria observable.

Jordano introduce un marco estructurado: los «nueve límites planetarios» definidos en 2009 por la ciencia para no comprometer la estabilidad del sistema Tierra. «En 2023

ya habíamos rebasado seis de esos nueve límites. Entre los más sobrepasados están el cambio climático y la pérdida de biodiversidad». Estos límites actúan como una especie de sistema de alarma global. Traspasarlos compromete el equilibrio sobre el que se construye nuestra civilización.

Aunque las políticas de deforestación y conservación en los países más avanzados han surtido efecto en los últimos años, el deterioro de la biodiversidad en regiones en desarrollo es un problema global. Delibes, cuya acción fue decisiva para proteger el que fue considerado el felino más amenazado del mundo, lo sabe muy bien.

### «Doñana es el Museo del Prado de la naturaleza europea»

**Pedro Jordano**

«Tenemos casos muy evidentes de éxito en la conservación, como ha ocurrido (y me alegra sobremanera) con el lince ibérico, a cuyo estudio dediqué muchos años», explica.

«Desafortunadamente, esos éxitos de conservación en los «países ricos» llevan aparejada a menudo destrucción ambiental en los países del llamado Sur Global. Podemos permitirnos el lujo de ganar bosque porque traemos la madera, o la soja, o el aceite de palma, de otros lugares donde el bosque se destruye».

Uno de los dilemas más inquietantes es que muchas de

las soluciones tecnológicas al cambio climático dependen de recursos escasos, cuya extracción amenaza precisamente esa biodiversidad que deberíamos proteger.

La explotación de fondos oceánicos para obtener telurio, por ejemplo, pone en riesgo ecosistemas poco conocidos que podrían albergar la clave para futuras terapias contra el Alzheimer o el cáncer. «No hay coste ambiental cero en el desarrollo tecnológico, y es un coste que no solo paga la naturaleza: también lo pagaremos nosotros», advierte Jordano.

---

**«DOÑANA ES  
UN LABORATORIO VIVO.  
POR ESO LO  
CONSERVAMOS»**

**Miguel Delibes de Castro**

**«LA CIENCIA  
FORTALECE LA  
DEMOCRACIA»**

**Pedro Jordano**



Miguel Delibes de Castro dirigió la Estación Biológica de Doñana desde 1988 hasta 1996. Los flamencos que se ven en el parque no crían allí, sino que vuelan desde las marismas o las lagunas de Málaga.

Imagen: Lanpernas (Flickr).



Pedro Jordano ha estudiado las interacciones entre plantas y polinizadores en zonas como el Parque Nacional del Teide. En la imagen, un ejemplar de abeja '*Anthophora alluaudi*' visita flores de '*Echium wildpretii*' o tajinaste rojo, una especie endémica de las Islas Canarias.


Fotografía: Pedro Jordano.

Pocos lugares simbolizan tan bien la tensión entre conservación y deterioro como Doñana. «Es como el Museo del Prado de la naturaleza europea», dice Jordano. «Un espacio con una diversidad de hábitats y especies que ha tenido un papel clave en el desarrollo de las ciencias naturales en España».

Delibes recuerda que conservarlo fue una decisión colectiva: «Lo hemos hecho los andaluces, los españoles, los europeos y los ciudadanos del mundo. Esa decisión obliga». Ambos coinciden en que Doñana funciona como un laboratorio vivo donde se han planteado problemas globales: sobreexplotación hídrica, especies invasoras, cambio climático.

«Doñana es un reflejo de muchos de los problemas globales: sobreexplotación de recursos hídricos, pérdida de biodiversidad y presión humana. ¿Hasta qué punto es un caso único y en qué medida es un síntoma de un problema más amplio?», reflexiona Jordano.

El profesor de investigación del Departamento de Ecología Integrativa en la Estación Biológica de Doñana del CSIC, alerta de que muchas especies invernantes han reducido sus migraciones hasta Doñana, y que especies clave para el equilibrio del bosque están disminuyendo. «Sabemos que, si no actuamos rápidamente sobre el problema del nivel freático y aseguramos la conservación del acuífero, llegaremos a un punto de no retorno tras el cual será imposible restau-



«Doñana ha tenido un papel clave en el desarrollo de las ciencias naturales en España»

**Pedro Jordano**

rar estados previos mejor «conservados». Además, añade Delibes, «si el acuífero sigue degradándose acabará faltando agua no solo para regar, sino también para que podamos beber las personas».

La situación en Doñana es, en muchos sentidos, la mejor de las posibles dadas las presiones del entorno. Pero eso no es consuelo: es advertencia. «Si no somos capaces de mantener ni siquiera las áreas protegidas, ¿qué no ocurrirá en otras de las que nos ocupamos menos?», se pregunta Delibes. Aun así, la experiencia demuestra que la ciencia puede ser una aliada poderosa de la conservación. Las soluciones existen: faltan voluntad, recursos y continuidad. La salida a esta crisis no pasa solo por la tecnología, sino por una transformación cultural profunda. «Nuestra educación occidental está basada en el consumo», reconoce Jordano. «Y eso no es malo en sí, siempre que sea comedido y consciente del coste de cada acto de consumo». El problema es el despilfarro y la consiguiente generación de residuos.

Delibes coincide: «Pienso que hay capas crecientes de la población dispuestas a aceptar cambios en su estilo de vida, siempre que se nos ofrezca un camino para que la transición sea lo menos costosa posible». La clave está en acompañar ese cambio con equidad, evitando que el mayor esfuerzo recaiga en quienes menos responsabilidad tienen.

Ambos defienden una ciencia al servicio de la sociedad, pero también protegida por ella. «La buena ciencia sólo puede desarrollarse en sociedades democráticas, que favorecen la creatividad y la innovación», afirma Jordano. «A cambio,

la ciencia fortalece a la democracia. Nos hace más críticos, rigurosos y capaces de afrontar decisiones difíciles».

La biodiversidad no se negocia. No se puede restaurar a golpe de mercado, ni reemplazar con inteligencia artificial. Se protege o se pierde. Pero estamos a tiempo: los sistemas vivos, como los humanos que los estudian y los defienden, tienen una notable capacidad de adaptación.

«No hay una economía basada en la biodiversidad y otra en la explotación. Toda economía debe estar integrada en la naturaleza y por tanto sometida a las normas de la ecología», recordaba Delibes.

Y esa es, quizá, la verdad más incómoda del progreso que heredamos: no seremos ricos si antes no somos sostenibles. Pero también es una llamada a actuar: porque aún podemos elegir cómo será el mundo que dejemos tras nosotros.

«Toda economía debe estar  
integrada en la naturaleza»

**Pedro Jordano**



## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### BLOQUE II

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### BLOQUE III

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# CAMBIO CLIMÁTICO

Lenguaje Tierra

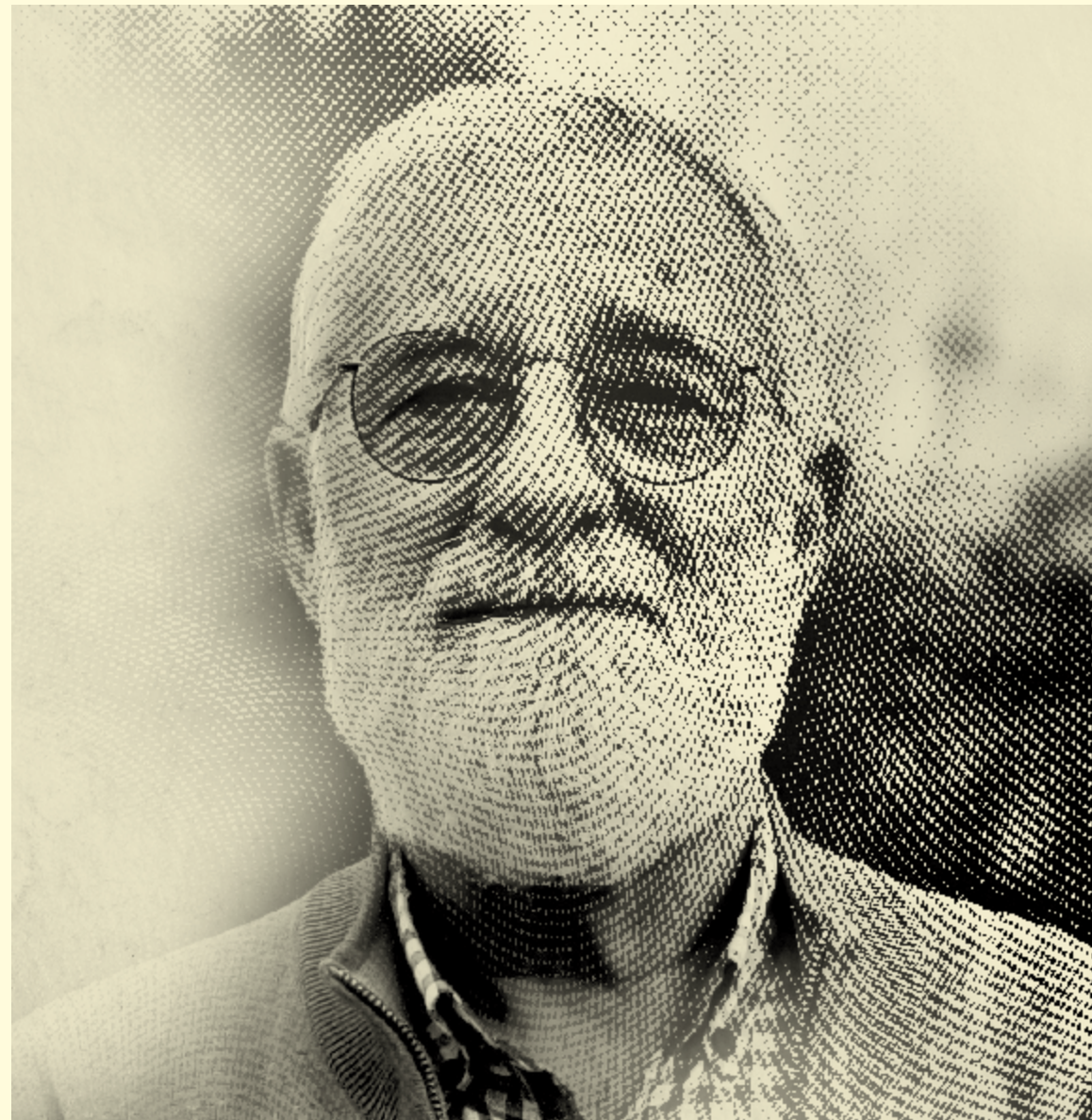
Traducir las señales del clima para un futuro mejor.

**Salud Deudero y José Manuel Moreno.**





**Salud Deudero**



**José Manuel Moreno**

## PRÓLOGO

## MUY HUMANOS

### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

## AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Salud Deudero

**Palma, 4 de junio de 1968**

**Ingreso en la RAC: 25 de septiembre de 2024**

Salud Deudero es doctora en Biología por la Universidad de las Islas Baleares y máster en Ecología Marina Fundamental y Aplicada por la Universidad de Gante (Bélgica).

Su carrera investigadora se ha centrado en la ecología costera, con especial atención a las redes tróficas, especies invasoras, áreas marinas protegidas, y el impacto de contaminantes y microplásticos en la biota marina.

Ha sido investigadora postdoctoral en la Universidad de Newcastle (Reino Unido) y profesora en másteres de Ecología Marina y Cambio Global. Desde diciembre de 2023 dirige el Centro Oceanográfico de Baleares del IEO-CSIC. En julio de 2024 fue nombrada delegada institucional del CSIC en las Islas Baleares.

Ha liderado numerosos proyectos de investigación y es autora de más de ciento cincuenta artículos científicos.

Ha ocupado puestos relevantes en organismos como el Comité de Ecosistemas Marinos del CIESM y ha sido asesora de la Agencia Estatal de Investigación. En 2023 fue distinguida con el Premi Ramon Llull por su trayectoria científica. Su trabajo contribuye a la conservación y gestión sostenible del medio marino en el Mediterráneo.

### **Saber más**

Personal y transferible.

**Una especie marina.**

Un tardígrado.

**Un pueblo.**

Deià, en Mallorca.

**Un recuerdo de la infancia.**

Las calas del Parque Nacional de Cabrera.

**Mayor logro de su carrera profesional, hasta la fecha.**

Ser académica de la RAC.

**Un miedo.**

A la muerte.

**Un lugar por descubrir.**

Filipinas.

**Invento favorito de la ciencia.**

Electricidad.

**Qué le genera estrés.**

Interaccionar con ordenadores.

**Un sonido.**

Viento.

**Inventor/a favorito/a de la ciencia.**

Leonardo da Vinci.

**¿Dónde encuentra la inspiración?**

En el mar.

**Héroe/ Heroína de ficción.**

Pippi calzaslargas.

**En la vida real, persona que más admira.**

A mi abuela.

**Un sueño.**

Circunnavegar el globo.

**Impacto negativo humano sobre los ecosistemas que urge evitar.**

Degradación de los mares y océanos y la pérdida de biodiversidad marina por alteraciones en los ecosistemas debidas a contaminación, sobrepesca, fragmentación de hábitats, entre otros.

**Una canción.**

‘Torna a Surriento’, de Ernesto de Curtis.

## PRÓLOGO

## MUY HUMANOS

### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

## AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# José Manuel Moreno

**Espinoso del Rey, 26 de enero de 1952**  
**Ingreso en la RAC: 22 de mayo de 2024**

José Manuel Moreno Rodríguez es catedrático emérito de Ecología en la Universidad de Castilla-La Mancha. Doctor en Biología por la Universidad Complutense de Madrid, ha centrado su carrera en la ecología de los incendios forestales y su relación con el cambio climático. Ha coordinado proyectos europeos como PostFIRE, LUCIFER, RICAMARE y FUME, y ha publicado más de ciento noventa trabajos científicos.

Fundó y dirigió el Instituto de Ciencias Ambientales (ICAM) y el Departamento de Ciencias Ambientales de la UCLM, además de ser decano comisario de la Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica. Ha participado en comités científicos de la Comisión Europea y del Programa Internacional Geosfera-Biosfera. Desde 2002, participa activamente en el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC).

Entre sus distinciones, la Medalla de Honor del Club Español del Medio Ambiente (2014) y el Premio Extraordinario de Medioambiente del Ministerio de Transición Ecológica (2022). Como miembro del IPCC, compartió el Premio Nobel de la Paz en 2007.

### **Saber más**

Personal y transferible.

**Lo primero que piensa cuando lee la palabra «incendio».**

Un proceso ecológico normal en muchos ecosistemas que requieren de él para persistir. El fuego destruye, sí, pero el sistema emerge de sus cenizas y se regenera.

**Un recuerdo de Espinoso del Rey.**

Ninguno, pues mis padres se mudaron a otro pueblo cuando yo tenía cinco meses. No obstante, algo ha quedado grabado en mi mente, y eso fue mi bautizo. No estaba en condiciones de enterarme de lo que pasaba a mi alrededor, pero la fiesta fue grande, y sus ecos persisten vívidos en mi memoria tras habérselo oído relatar una y otra vez a mis padres.

**Invento favorito de la ciencia.**

El avión, por el desafío a la gravedad.

**Un miedo.**

No soy persona de miedos.

**Una verdad científica que considere importante.**

El origen común de todos los organismos del planeta, regidos por un código universal, a partir de unas cuanta moléculas existentes en los

sistemas acuáticos primigenios.

**Pasatiempos favorito.**

Viajar, conocer la naturaleza allá donde voy.

**Una tecnología.**

El ordenador.

**El mayor reto de su carrera profesional, hasta la fecha.**

La dificultad/imposibilidad de experimentar con fuego en España. La ciencia avanza testando hipótesis y, en mi caso, eso significa que hay que hacer incendios experimentales, pequeños y controlados.

**¿Qué le inspira?**

Mi propio deseo de conocer y hacer bien las cosas y el bien.

**Una bebida.**

Agua, a poder ser de una fuente o un manantial. Cuando de niños jugábamos en el campo, era un ritual acercarse a beber a cualquier fuente o manantial. El agua estaba fresquita y a su alrededor crecían plantas que llamaban nuestra atención.

**¿Una máxima?**

No rendirse. Hay que seguir intentándolo.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Ciencia para un planeta vivo: del diagnóstico a la acción.

## Una mirada dual desde la tierra y el mar.

Dos referentes españoles de la ecología, José Manuel Moreno y Salud Deudero, defienden el papel esencial de la ciencia en la lucha contra el cambio climático y la degradación ambiental, pero también miran con esperanza el futuro y sugieren rutas más sostenibles.

¿Qué habría pasado si la ciencia no hubiera hablado claro sobre el cambio climático? ¿Y si no hubiéramos conocido la amenaza invisible de los microplásticos? La respuesta, según el catedrático José Manuel Moreno y la investigadora Salud Deudero, no deja lugar a dudas: habríamos ido hacia el desastre sin saberlo. Y en buena medida, seguimos expuestos. Pero, al menos, hoy sabemos a qué nos enfrentamos, cuáles son las soluciones y qué riesgos podemos evitar. «La ciencia habló alto y claro desde hace tiempo y nadie ha sido capaz de cuestionarlo», afirma Moreno. «La ciencia proporciona una base sólida para construir políticas públicas eficaces», corrobora Deudero.

Ambos expertos coinciden en que la ciencia ha sido crucial no solo para diagnosticar la situación, sino para ofrecer alternativas viables. Sin embargo, también reconocen que los avances políticos y sociales no están a la altura de lo que los datos demandan. Y alertan de que negar la ciencia o marginarse en la toma de decisiones solo multiplica los riesgos y agrava las crisis.

«La ciencia ha sido el principal baluarte de la lucha contra el cambio climático»

**José Manuel Moreno**

Aun así, ambos defienden que hay motivos para el optimismo: el conocimiento acumulado, la tecnología disponible, el compromiso ciudadano creciente y el ejemplo de muchas iniciativas exitosas demuestran que revertir la situación es posible y está en nuestras manos.

«La ciencia ha sido el principal baluarte de la lucha contra el cambio climático», recuerda Moreno, ecólogo referente mundial en los estudios sobre cambio climático y miembro destacado del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC. Su relato sobre los avances del conocimiento climático desde los años 80 hasta hoy muestra cómo la evidencia se ha acumulado y reforzado: «La humanidad estaba cambiando el clima a un ritmo como no había ocurrido en millones de años». La investigación, explica, ha

permitido comprender los mecanismos del calentamiento global, diseñar modelos predictivos y ofrecer rutas claras hacia la mitigación y la adaptación.

En paralelo, la bióloga marina Salud Deudero destaca la capacidad de la ciencia para detectar amenazas invisibles, como la contaminación marina por plásticos y microplásticos o la desaparición de las especies a manos de la acción humana: «La falta de estudios sobre los plásticos habría impedido reconocer su papel como vector de toxicidad ambiental». Desde su refugio frente al Mediterráneo como Delegada Institucional del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) en las Islas Baleares y directora del Centro Oceanográfico de Baleares del Instituto Español de Oceanografía, sus investigaciones han establecido relaciones directas entre estos residuos y las alteraciones fisiológicas en especies marinas clave, afectando redes tróficas completas.

La ciencia, añade, ha permitido también identificar la toxicidad acumulada entre compuestos: «Abordamos el análisis de sinergias entre la ingesta de microplásticos y compuestos como ftalatos o bisfenoles, con el objetivo de comprender los mecanismos de toxicidad conjunta». Esta aproximación integradora ha generado protocolos replicables de seguimiento y evaluación que ya están siendo adoptados en programas de vigilancia ambiental europeos.

«La sensibilidad hacia el cambio climático sigue creciendo»

**José Manuel Moreno**

Entre la urgencia y la oportunidad.

Si el conocimiento es claro, ¿por qué no avanza con la misma claridad la política o la empresa? Deudero identifica una de las principales barreras en la desconexión entre los tiempos de la ciencia y los de la política: «Las decisiones se ven condicionadas por intereses económicos o ideológicos que no necesariamente priorizan la sostenibilidad». Pero ambos coinciden en que ir en contra de la preservación es también económicamente desastroso. Moreno es contundente: «Gobernar en contra de la ciencia aumenta las catástrofes».

Ambos subrayan la paradoja del momento: una ciudadanía cada vez más sensibilizada, pero cuyas decisiones no siempre reflejan esa preocupación. Moreno señala que «la sensibilidad sobre este tema ha seguido creciendo, encuesta tras encuesta. Lo contradictorio es que no necesariamente se ha visto reflejada a la hora de votar».

Aun así, reconocen que se han producido avances relevantes. «Aunque las dinámicas cortoplacistas dominan, hemos adoptado decisiones de grandísimo calado», afirma Moreno. Y añade: «Las energías renovables son ya más baratas que las de combustibles fósiles, y eso no ha caído del cielo. Ha sido fruto de decisiones políticas, investigación y desarrollo acumulado. A través de ellas hoy tenemos alternativas limpias e inagotables que habrían resuelto el problema del mundo por mucho tiempo».

Además, pese a los obstáculos, muchos gobiernos y empresas no pueden permitirse ignorar la evidencia científica y se han sumado a la acción climática.

Los grandes gestores de fondos saben del coste de no incluir criterios medioambientales en sus inversiones por lo que incluyen ya una selección en la que prima la acción climática mientras avanza una legislación cada vez más precisa de los objetivos climáticos de las grandes corporaciones en los países más avanzados.

Mientras la India acaba de presentar un borrador de 'Taxonomía de Finanzas Climáticas' para movilizar la financiación sostenible, EE.UU. ha dado un salto cualitativo y cuantitativo en la inversión en energías limpias en estados tan conservadores como Iowa o Texas. Organizaciones como America is All In muestran el compromiso de la sociedad estadounidense con miles de ciudades, estados, tribus, empresas e instituciones de diversos ámbitos muestran su compromiso para alcanzar los objetivos descontaminantes del Acuerdo de París.

Desde el punto de vista corporativo, el informe '2024 State of Corporate Climate Commitment' elaborado por Carbon Direct revela que el 96% de los profesionales corporativos afirman que sus organizaciones han tomado o planean tomar medidas climáticas. Además, el 83% de las empresas que han iniciado acciones para descarbonizar sus operaciones han establecido objetivos públicos de sostenibilidad.

# 96%

## **Objetivos de sostenibilidad.**

Profesionales corporativos que afirman que sus organizaciones han tomado o planean tomar medidas climáticas.

# 83%

## **Medidas climáticas.**

Empresas que descarbonizan sus operaciones y establecen objetivos públicos de sostenibilidad.

Fuente:

'2024 State of Corporate Climate Commitment', Carbon Direct.

**«DEBEMOS PROMOVER  
ENTORNOS DE  
INVESTIGACIÓN  
INDEPENDIENTES»**

**Salud Deudero**

**«LA CIENCIA HABLÓ  
ALTO Y CLARO Y NADIE  
HA SIDO CAPAZ DE  
CUESTIONARLA»**

**José Manuel Moreno**

## Ecosistemas interconectados.

---

Aunque sus campos de investigación son diferentes, ambos ecólogos analizan procesos globales que se interrelacionan. Moreno ha dedicado gran parte de su carrera a estudiar los incendios forestales y su relación con el cambio climático y los usos del suelo. «Hoy en día no es posible entender los ecosistemas terrestres del mundo sin el fuego», asegura. El abandono rural, la acumulación de vegetación y el aumento de las temperaturas han convertido amplias zonas del sur de Europa en polvorines ambientales».

Su análisis no se detiene en la superficie terrestre. Moreno documenta cómo los incendios pueden generar consecuencias inesperadas en los sistemas marinos. «Los incendios de Australia en 2020 provocaron una fertilización masiva del Pacífico Sur por los aerosoles cargados de nutrientes», explica. Este fenómeno desencadenó un aumento de la productividad del fitoplancton a gran escala, revelando que «los efectos del fuego pueden ir mucho más allá del impacto inmediato sobre los ecosistemas costeros».

Por su parte, Deudero investiga cómo los residuos plásticos y otros contaminantes impactan en la biodiversidad marina. «La degradación de los océanos limita su capacidad como sumidero de carbono, alterando el balance climático global», señala. Su equipo ha estudiado efectos fisiológicos, bioacumulación de contaminantes y la interrupción de funcio-

nes clave de especies marinas. «La pérdida de biodiversidad marina representa una de las amenazas más acuciantes para la estabilidad del sistema planetario. Las especies marinas no sólo cumplen funciones ecológicas específicas —como la «filtración, la regulación del carbono o la estabilización de sedimentos—, sino que su interacción genera sinergias funcionales que sustentan la resiliencia del ecosistema en su conjunto. La desaparición de especies clave puede desencadenar procesos de simplificación trófica, colapso de hábitats y disminución de la productividad pesquera. Además, afecta directamente a los medios de vida de millones de personas y compromete la seguridad alimentaria global. Por tanto, la conservación de la biodiversidad marina no es solo una cuestión ética, sino una necesidad funcional para la supervivencia de nuestras sociedades».

«Hoy en día no es posible entender los ecosistemas terrestres del mundo sin el fuego»

**José Manuel Moreno**

Con la pasión de quien cree profundamente en que su trabajo puede cambiar el mundo, Deudero explica la importancia de la salud de los sistemas oceánicos: «Los océanos son el mayor sistema regulador del clima en el planeta. Al absorber cerca del 25% del CO<sub>2</sub> antropogénico y

almacenar más del 90% del exceso de calor generado por el efecto invernadero, desempeñan un rol crítico en la moderación de los efectos del cambio climático. También generan más de la mitad del oxígeno que respiramos y sostienen la base alimentaria de millones de personas. Su degradación, por tanto, representa una pérdida de funcionalidad ecosistémica sin precedentes. Conservar los océanos implica proteger los mecanismos naturales de regulación climática, preservar la biodiversidad y garantizar la seguridad biofísica del planeta. Esta conservación debe abordarse desde un enfoque ecosistémico, interdisciplinar, que integre ciencia, política y acción ciudadana».

Añade que ignorar los efectos contaminantes de la acción humana tiene consecuencias directas también sobre nuestra salud: «Desde una perspectiva ecotoxicológica, los efectos combinados de los microplásticos y otros contaminantes —tema central de mis investigaciones— ilustran cómo la ignorancia voluntaria puede acelerar procesos de colapso ecológico con implicaciones irreversibles para los servicios ecosistémicos y la salud pública».

«Los océanos son el mayor regulador del clima en el planeta»

**Salud Deudero**



Las investigaciones de Salud Deudero han establecido relaciones directas entre residuos plásticos y alteraciones fisiológicas en especies marinas clave.

Imagen: Lance Anderson.

José Manuel Moreno señala un hito en la lucha contra el cambio climático: el año 1987, cuando las burbujas atrapadas en los polos constataron la relación entre la cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y su temperatura.

Imagen: Pawel Czerwinski.

«La divulgación permite tender puentes entre ciencia, política y ciudadanía»

**Salud Deudero**

Ambos entrevistados coinciden en que la ciencia necesita una mejor comunicación. Deudero destaca el papel de la divulgación empática: «Permite tender puentes entre ciencia, política y ciudadanía». Moreno, por su parte, subraya la importancia de combatir la desinformación digital: «Las universidades y las instituciones deberían abandonar aquellas redes sociales donde los algoritmos manipulan la información científica».

Frente a ese panorama, ambos destacan la importancia de fortalecer la educación en pensamiento crítico. Deudero propone «promover entornos de investigación independientes y transparentes, garantizar el acceso abierto a los resultados científicos y fomentar la rendición de cuentas en la producción de conocimiento». Moreno propone ser exigentes con los responsables públicos: «Lo que debemos exigir a los políticos es que cuando se pronuncien sobre un supuesto científico no nos den su opinión, sino que digan en qué informe científico riguroso se basan».

También hay espacio para la esperanza activa. Moreno

cita como ejemplo los proyectos de ciencia ciudadana que han documentado el declive de especies como las mariposas en Estados Unidos: «Con poco entrenamiento puedes tener una legión de voluntarios tomando datos enormemente valiosos». Este vínculo entre conocimiento, participación y acción es una de las claves para reforzar el papel de la ciencia como herramienta de transformación.

Y es en ese contexto en el que, pese a la magnitud de los desafíos, ambos científicos conservan una visión optimista y constructiva. La investigación aplicada, el avance tecnológico, el compromiso de muchas comunidades y la creciente concienciación ciudadana son razones para la confianza. «Conservar los océanos implica proteger los mecanismos naturales de regulación climática, preservar la biodiversidad y garantizar la seguridad biofísica del planeta», resume Deudero.

Además, señala que las empresas tienen margen de acción clave: «Pueden adoptar un enfoque proactivo y colaborativo. Algunas acciones incluyen sustituir materiales contaminantes, incorporar análisis de ciclo de vida, establecer sistemas internos de trazabilidad y financiar proyectos de restauración marina».

Moreno concluye con una idea central: «Salir de esta trampa depende de nuestras decisiones. Y hay alternativas. Empujemos para que las renovables se adueñen de nuestro modelo energético y dejemos atrás la glotonería del carbón fósil. ¡Viviremos mucho mejor!»

La ciencia, en suma, no sólo documenta el colapso. Tam-

bién revelar los caminos para evitarlo y demuestra que un futuro distinto es todavía posible. Pero necesita ser escuchada, comprendida y, sobre todo, aplicada.

«Con poco entrenamiento, puedes tener una legión de voluntarios tomando datos valiosos»

**José Manuel Moreno**

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### BLOQUE II

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### BLOQUE III

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### AYER Y MAÑANA

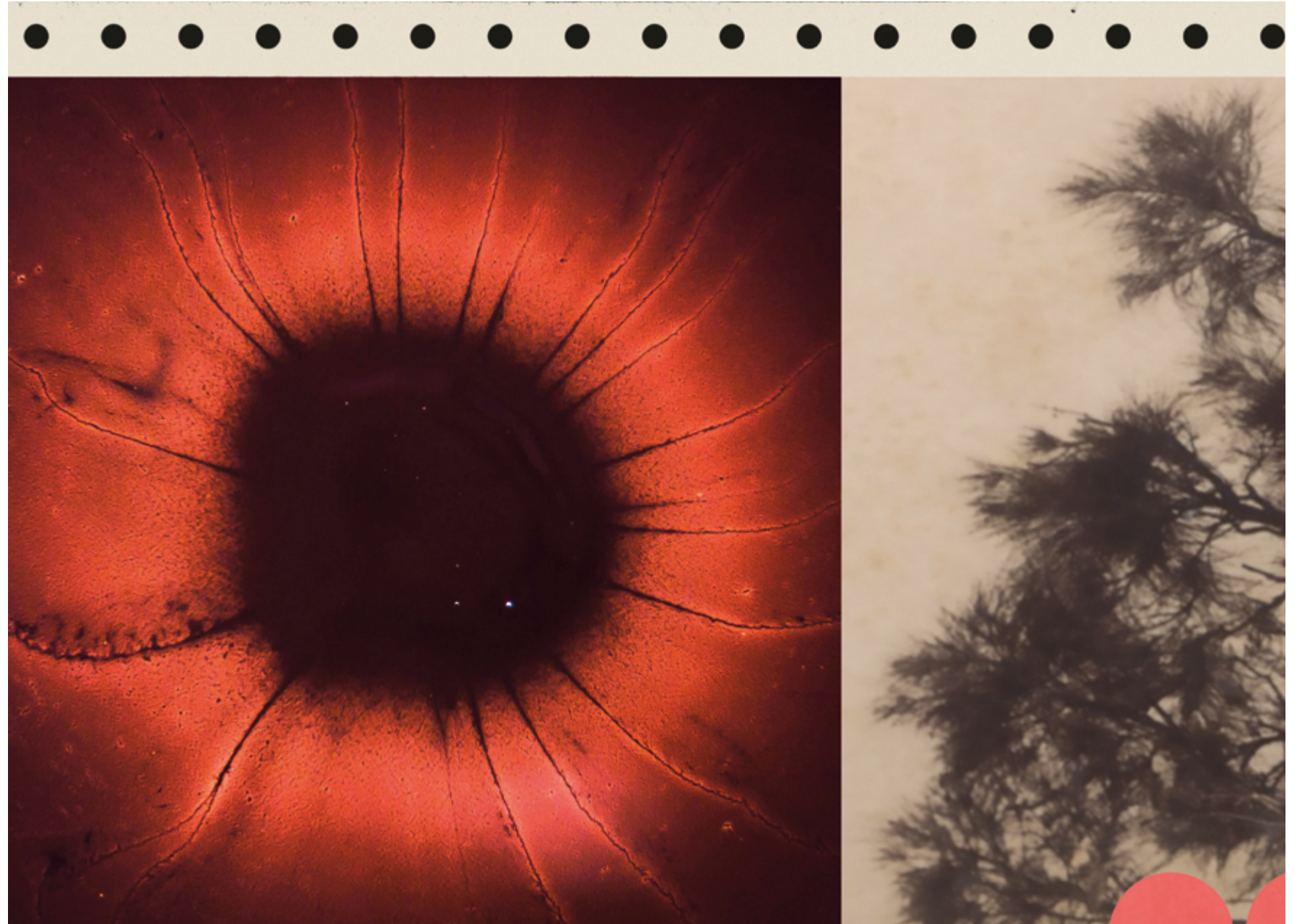
## EPÍLOGO

# NEUROCIENCIA Y CEREBRO

En tu mente, el mundo

Neurociencia para entender el cerebro y mejorar nuestros días.

**Juan Lerma y Guillermina López-Bendito.**





**Juan Lerma**



**Guillermina López-Bendito**

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Juan Lerma

## Moral de Calatrava, 5 de junio de 1955 Ingreso en la RAC: 26 de marzo de 2025

Juan Lerma es un destacado neurocientífico español y profesor de investigación del CSIC en el Instituto de Neurociencias de Alicante (CSIC-UMH). Licenciado en Biología por la Universidad Complutense de Madrid (1978) y doctor en Ciencias por la Universidad Autónoma de Madrid (1983), inició su carrera en el Hospital Ramón y Cajal y posteriormente trabajó en el Albert Einstein College of Medicine de Nueva York. En 1990 regresó al Instituto Cajal, donde estableció su propio laboratorio centrado en el estudio de los receptores de glutamato. Desde 2004, se incorporó al Instituto de Neurociencias de Alicante, donde fue director entre 2007 y 2016.

Su investigación se ha centrado en los receptores de kainato (KARs), siendo pionero en describir su existencia en neuronas centrales.

Ha sido editor jefe de la revista 'Neuroscience' y es miembro de organizaciones científicas como EMBO, la Academia Europea y la European Dana Alliance for the Brain. En 2022, fue elegido vicepresidente del Consejo Europeo del Cerebro (EBC). Entre sus premios, la Medalla de Oro del Instituto de Neurociencias (2016) y la Distinción al Mérito Científico de la Generalitat Valenciana.

### Saber más

Personal y transferible.

#### Un rincón de Alicante.

El barrio de Santa Cruz.

#### Una canción.

'Sultans of Swing', de Dire Straits.

#### Un misterio del cerebro que sueña con descifrar.

La conciencia.

#### ¿Qué está leyendo en este momento?

'El tiempo envejece deprisa', de Antonio Tabucchi.

#### El mayor reto de su carrera profesional.

Está por llegar.

#### Algo que siempre le hace reír.

Los chistes inteligentes.

#### Lo que más le fascina de las neuronas.

Su actividad incesante.

#### Un postre.

La torrija de 'brioche'.

#### Invento favorito de la ciencia.

Los antibióticos.

#### Deporte favorito.

Ninguno en particular.

#### Un recuerdo de su infancia.

Los colores ocres del campo manchego.

#### Cualidad que más aprecia en sus colegas de investigación.

La integridad.

#### Una persona a la que admire.

Santiago Ramón y Cajal.

#### Una certeza.

La muerte después de la vida.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Guillermina López-Bendito

**Santo Domingo, 19 de septiembre de 1975**

**Ingreso en la RAC: 22 de febrero de 2023**

Guillermina López-Bendito es doctora en Neurociencias por el Instituto de Neurociencias de Alicante (CSIC-UMH), donde también es profesora de investigación y dirige el grupo «Desarrollo, Plasticidad y Reprogramación de los Circuitos Talamocorticales» desde 2008 y el Departamento de Neurobiología del Desarrollo.

Es una figura destacada en el estudio del desarrollo de circuitos sensoriales, pionera en el análisis de la actividad cerebral espontánea en embriones y en estrategias de reprogramación neuronal para recuperar funciones tras pérdida sensorial. Ha liderado múltiples proyectos nacionales e internacionales, incluidos tres del European Research Council, entre ellos una Advanced Grant.

Entre sus numerosos galardones destacan el Premio Rei Jaume I en Investigación Médica (2023), el Premio IBRO-Kemali (2017) y su elección como miembro de EMBO (2020).

Con más de una década de liderazgo científico, su grupo ha generado conocimiento clave sobre la formación y plasticidad de circuitos cerebrales, con aplicaciones potenciales en terapias para trastornos neurológicos.

### **Saber más**

Personal y transferible.

#### **Su sentido favorito.**

La vista: me fascina cómo el cerebro interpreta la luz y construye el mundo a partir de ella.

#### **Un recuerdo de Santo Domingo.**

Los cocos, su sabor.

#### **Una ciudad.**

Buenos Aires, por su energía, su mezcla de tradición y modernidad, y su intensidad cultural.

#### **La cualidad del cerebro humano que más le sorprende.**

Su capacidad para adaptarse y reconfigurarse, incluso tras una lesión.

#### **Un reconocimiento que le haya ilusionado.**

El Premio Jaume I, porque sentí que reconocía no solo mi trabajo, sino también todo el camino recorrido con mi equipo y el valor de la ciencia básica hecha desde España.

#### **Un sonido.**

Las olas del mar: me transmiten calma, fuerza y perspectiva.

#### **Un/a mentor/a profesional.**

Marie Curie: su rigor, valentía y pasión por la ciencia siguen siendo

una inspiración constante.

#### **Qué le genera estrés.**

La falta de tiempo para pensar con profundidad.

#### **Descanso favorito.**

Hacer rompecabezas.

#### **En una palabra, lo mejor de la neurociencia.**

Asombro.

#### **Un sueño para su grupo de investigación.**

Que nuestras ideas inspiren nuevas formas de diagnosticar o tratar trastornos del neurodesarrollo.

#### **Un pasatiempo.**

Hacer manualidades: me relaja y me permite desconectar creando con las manos.

#### **Persona que inspira sus días.**

Mis hijos, con su mirada limpia y su curiosidad infinita.

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### **BLOQUE II**

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### **BLOQUE III**

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### **AYER Y MAÑANA**

## **EPÍLOGO**

# Circuitos que aprenden, cerebros que inspiran.

Lo que las neuronas nos enseñan.

Dos referentes de la neurociencia española, Juan Lerma y Guillermina López-Bendito, exploran el desarrollo cerebral, el diálogo con la inteligencia artificial y los retos de una ciencia que empieza a descifrar el lenguaje secreto del pensamiento.

¿Cómo se construye el pensamiento? ¿Qué ocurre en el cerebro antes de nacer? ¿Cómo entender la actividad neuronal puede ayudar a prevenir trastornos como el autismo o la esquizofrenia? Estas son algunas de las preguntas que ocupan a dos de los neurocientíficos más influyentes de España: Juan Lerma y Guillermina López-Bendito.

Responderlas ayuda a expandir nuestro conocimiento sobre cómo somos y nos formamos, pero también allana el camino hacia una medicina más personalizada, una inteligencia artificial más eficiente y una sociedad más empática y consciente.

Desde trayectorias distintas pero complementarias, investigan cómo se forman y se comunican los circuitos neuronales. Lerma, centrado en la sinapsis (el lugar en el

que las neuronas se comunican entre sí para transmitir información) y su relación con patologías psiquiátricas, y López-Bendito, pionera en observar la actividad cerebral en embriones, comparten una misión: comprender los mecanismos más profundos del sistema nervioso.

«Tan neurocientífico es un físico como un biólogo o un médico si su ánimo es descifrar el cerebro»

**Juan Lerma**

Desde sus respectivos laboratorios, los dos biólogos exploran los fundamentos biológicos del pensamiento, la percepción y la conciencia.

«La sinapsis posibilita la existencia de los circuitos y hace que estos funcionen», resume sobre un proceso esencial para nuestro funcionamiento, para poder sentir, pensar y actuar el profesor de investigación del CSIC en el Instituto de Neurociencias de Alicante y consejero de la Society for Neuroscience.

Entre sus aportaciones más destacadas, Lerma logró demostrar que un gen clave en el síndrome de Down —ubicado en el cromosoma 21— alteraba la memoria espacial a través de su efecto sobre la sinapsis. Su grupo consiguió normalizar la expresión de este gen en modelos animales, revirtiendo esos déficits y abriendo nuevas líneas de investigación sobre posibles intervenciones. Además, ha contribuido a

esclarecer cómo actúan la mayoría de los fármacos psicoactivos, que interfieren directamente en la sinapsis para modular la comunicación entre neuronas, lo que ha permitido comprender mejor sus beneficios terapéuticos y también sus efectos secundarios.

«La actividad neuronal espontánea durante el desarrollo puede considerarse un lenguaje cerebral temprano», señala por su parte la doctora que dedica su vida al estudio del desarrollo de circuitos sensoriales.

El último gran logro del equipo que dirige en el mismo Instituto de Neurociencias de Alicante en el que investiga su compañero en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España ha sido descubrir que el cerebro en desarrollo es capaz de reorganizar sus mapas sensoriales cuando una persona nace sin una parte del cuerpo.



«La capacidad de reconfiguración es la base de la adaptabilidad del sistema nervioso»

**Guillermina López-Bendito**

**«EN CIENCIA, LOS  
TIEMPOS SON  
INEXORABLES Y NO SE  
DEBE ATROPELLAR A LA  
RAZÓN»**

**Juan Lerma**

**«EL DIÁLOGO ENTRE  
NEUROCIENCIA E IA  
ES BIDIRECCIONAL  
Y ENRIQUECEDOR»**

**Guillermina López-Bendito**

## Una disciplina hecha de muchas.

---

Para Lerma, que ha ocupado cargos clave en la neurociencia y liderado iniciativas internacionales, la neurociencia es una disciplina integradora por naturaleza: aúnan su esfuerzo materias clásicas como la fisiología o la bioquímica con otras más modernas como la robótica o la biología molecular con el objetivo común de entender cómo funciona el sistema nervioso.

En palabras de López-Bendito, galardonada en 2023 con el Premio Rei Jaume I de Investigación Médica, «la neurociencia es el esfuerzo colectivo por entender cómo el sistema nervioso se construye, funciona y se adapta para generar percepción, comportamiento y pensamiento».

Ambos destacan que este carácter multidisciplinar no es opcional, sino esencial. «Tan neurocientífico es un físico como un biólogo o un médico si el ánimo de los tres es descifrar los secretos del cerebro», afirma Lerma. López-Bendito lo refrenda desde la experiencia cotidiana de su laboratorio: «Trabajamos en la intersección de la neurobiología del desarrollo, la genética, la fisiología y la imagen avanzada, pero necesitamos colaborar estrechamente con expertos en bioinformática, física, inteligencia artificial o ingeniería biomédica».

El laboratorio de López-Bendito ha sido pionero en visualizar cómo se organiza la actividad neuronal en embriones intactos. Uno de sus hallazgos más relevantes es que, incluso antes del nacimiento, las neuronas generan patrones rítmi-

cos de actividad que actúan como señales instructivas para formar las conexiones del cerebro. «Estos patrones actúan como señales instructivas que guían la formación de las conexiones entre regiones del cerebro, ayudando a establecer la arquitectura básica de los circuitos».

Visualizar esta actividad implicó grandes desafíos técnicos: adaptar técnicas de imagen funcional de alta resolución, desarrollar preparaciones que preservan la integridad del embrión y adaptar sensores fluorescentes y análisis computacionales capaces de interpretar patrones complejos. El resultado: una ventana al cerebro en formación.

Juan Lerma se centra en el otro extremo: el estudio molecular y funcional de la comunicación entre neuronas. Su grupo demostró en 1993 la existencia de unos receptores poco conocidos: los de kainato, moléculas receptoras situadas en las neuronas que se activan en presencia de glutamato, uno de los principales neurotransmisores del cerebro. A diferencia de otros receptores, su función específica y su papel en distintas enfermedades neurológicas —como la epilepsia, el Alzheimer o el Parkinson— siguen siendo objeto de intensa investigación.

«Durante muchos años tratamos de averiguar cómo funcionaban estos receptores y cómo influenciaban la comunicación neuronal», explica Lerma. Hoy, su trabajo ha descubierto la relación entre esas alteraciones sinápticas y patologías como el autismo, la esquizofrenia o el síndrome de Down.

Para Lerma, la sinapsis es clave: allí se modula la activi-

### **Disciplinas que colaboran en neurociencia.**

La neurociencia requiere de la integración de materias dispares para descifrar los secretos del cerebro.

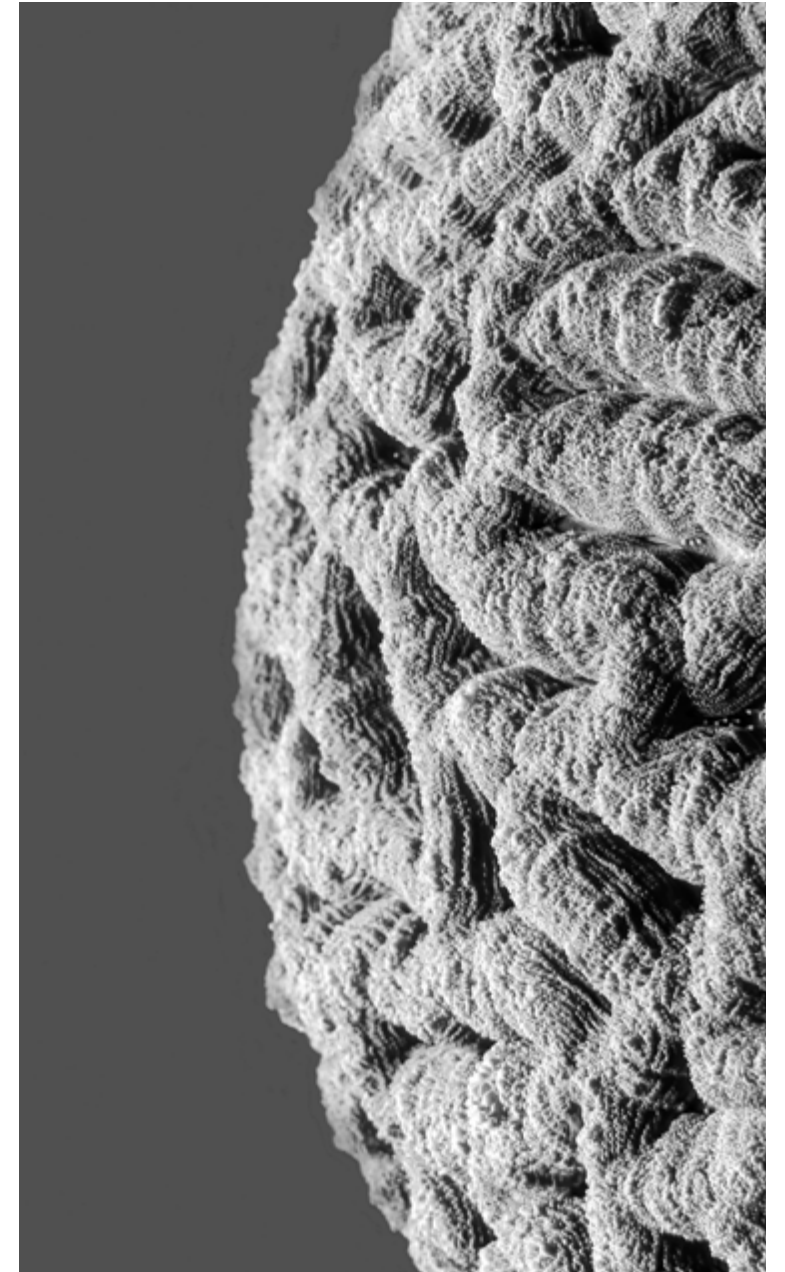
Fisiología.  
Bioquímica.  
Robótica.  
Biología molecular.

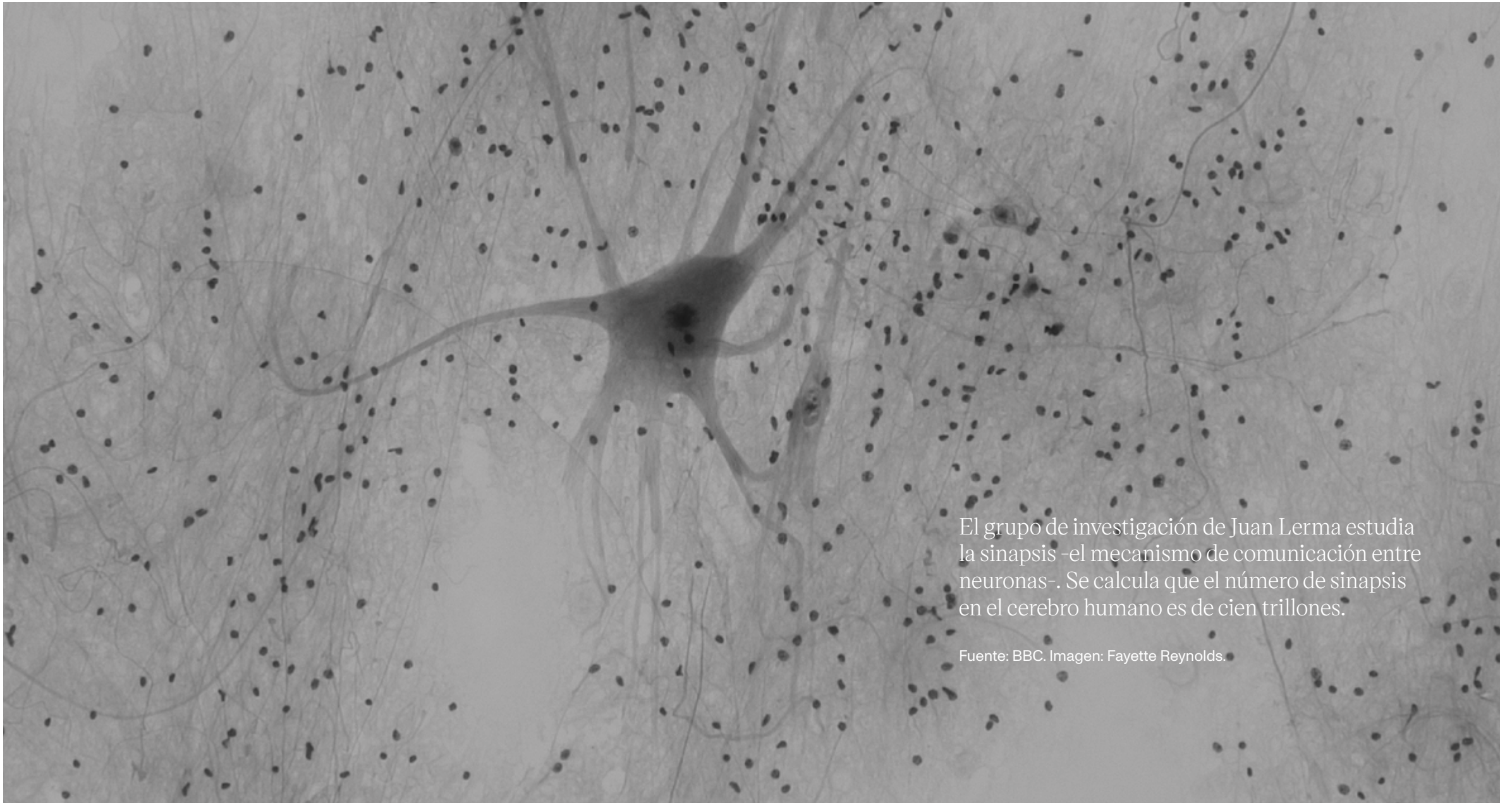
dad, se procesa la información y se inicia el aprendizaje. La plasticidad permite adaptar su eficacia con el uso y explica cómo el cerebro aprende y cómo pueden originarse muchas enfermedades mentales.

Esta plasticidad está en el centro también de los trabajos de López-Bendito, quien estudia la reorganización de los circuitos sensoriales ante lesiones o privaciones. «El cerebro en desarrollo se adapta a cambios genéticos o ambientales, y también a daños. Esa capacidad de reconfiguración es la base de la adaptabilidad del sistema nervioso».

«Los circuitos del cerebro son inspiradores para el desarrollo de algoritmos»

**Guillermina López-Bendito**



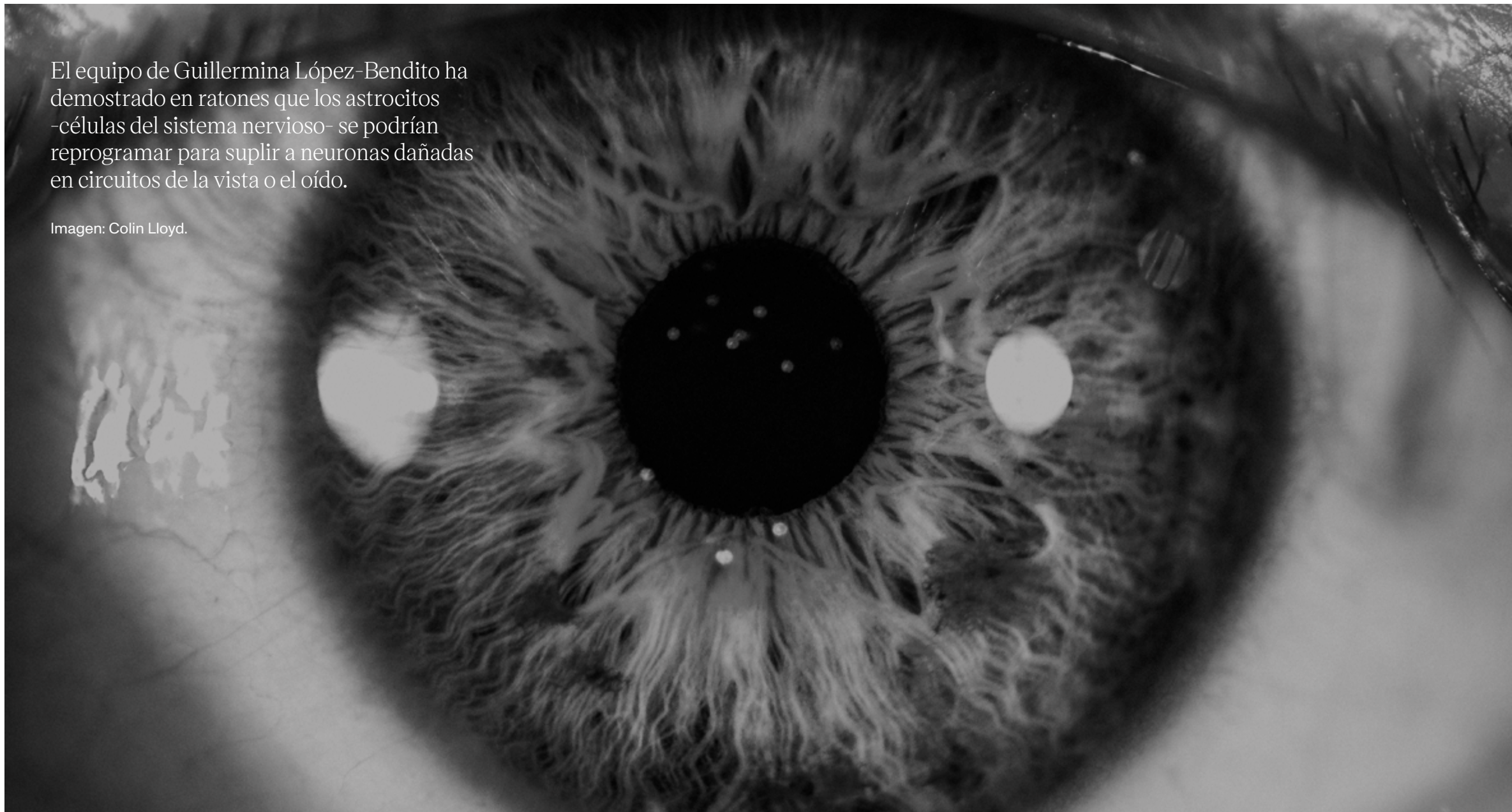


El grupo de investigación de Juan Lerma estudia la sinapsis -el mecanismo de comunicación entre neuronas-. Se calcula que el número de sinapsis en el cerebro humano es de cien trillones.

Fuente: BBC. Imagen: Fayette Reynolds.

El equipo de Guillermina López-Bendito ha demostrado en ratones que los astrocitos -células del sistema nervioso- se podrían reprogramar para suplir a neuronas dañadas en circuitos de la vista o el oído.

Imagen: Colin Lloyd.



## Cerebro e inteligencia artificial: un diálogo.

---

El cerebro humano y la inteligencia artificial aprenden de formas muy distintas, pero también pueden inspirarse mutuamente. Para López-Bendito y Lerma, el contraste entre ambos sistemas no anula el diálogo, sino que lo vuelve más fértil. Mientras la inteligencia artificial se entrena con grandes volúmenes de datos y reglas programadas, el cerebro se autoorganiza desde etapas tempranas del desarrollo y es capaz de adaptarse a condiciones cambiantes con una eficiencia asombrosa.

«Nuestras investigaciones abordan cómo se forman, reorganizan y refinan los circuitos sensoriales en el cerebro en desarrollo, y cómo la actividad espontánea y la interacción entre neuronas y astrocitos guían estos procesos», explica la neurocientífica. «Estos principios biológicos —la plasticidad, la autoorganización, la capacidad de adaptarse a entradas cambiantes— son altamente inspiradores para el desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial, especialmente en el campo del aprendizaje profundo».

«Por ejemplo, el estudio de la actividad espontánea como señal instructiva durante el desarrollo podría aportar claves sobre cómo los sistemas artificiales podrían beneficiarse de fases de entrenamiento sin supervisión previa. Del mismo modo, comprender cómo el cerebro distribuye selectivamente la información entre diferentes tipos celulares y regiones puede

inspirar nuevas arquitecturas en redes neuronales artificiales más eficientes y adaptativas. El diálogo entre neurociencia e inteligencia artificial es, sin duda, bidireccional y enormemente enriquecedor».

A pesar de que los nodos artificiales se inspiran en las neuronas biológicas, Lerma defiende la complejidad de la inteligencia natural frente a la artificial y subraya errores de concepto básicos como el uso común de la expresión «red neuronal artificial». «Es completamente inadecuado. Es artificial, pero no es neuronal. En todo caso, sería una red de nodos, no de neuronas. Una neurona es muchísimo más compleja que un nodo en una red artificial».

«La expresión «red neuronal artificial» es inadecuada. Una neurona es muchísimo más compleja que un nodo en una red artificial»

**Juan Lerma**

«Al comparar el cerebro biológico con las redes artificiales se me ocurren cuatro aspectos fundamentales a tener en cuenta. En primer lugar, la simplificación extrema de la inteligencia artificial. En el cerebro, las sinapsis biológicas son químicas y eléctricas, incluyen dinámicas temporales complejas y operan en entornos biológicos no lineales. Segundo, existe aún un problema de escala. El cerebro humano contiene unos 86.000 millones de neuronas y 100 billones de sinapsis, mientras que

incluso las redes neuronales más avanzadas (como GPT o AlphaZero) operan con una fracción de esa escala. En tercer lugar, existe un problema de temporalidad. Las sinapsis biológicas funcionan de manera continua y adaptativa en tiempo real; la mayoría de los modelos de inteligencia artificial se entrenan en bloques discretos de datos. Y por fin, existe una diferencia en términos de sostenibilidad. El cerebro consume el equivalente a una bombilla de 20W (80% por la actividad sináptica). Entrenar una sola vez GPT-3 (el sistema de inteligencia artificial usado por ChatGPT, con 175 mil millones de parámetros) consumió 1.287 MWh, es decir la energía producida por toda una planta nuclear en más de 1 hora. De seguir así, la operación de las redes artificiales será difícilmente sostenible».

---

# 86.000

**Millones de neuronas.**

El cerebro humano contiene aproximadamente este número de neuronas y unos cien trillones de sinapsis.

## Puentes con la clínica.

---

En sus respectivas carreras, los dos entrevistados se han enfrentado a las barreras que impiden que los descubrimientos básicos se conviertan en terapias. López-Bendito apunta a la distancia entre modelos animales y fisiopatología humana, a la fragmentación entre disciplinas y a los tiempos de evaluación: «Los tiempos de financiación y evaluación científica rara vez se adaptan al ritmo necesario para la maduración de ideas desde el laboratorio hasta la clínica».

Aun así, está abriendo puentes. Su grupo está explorando vías de colaboración con neuropediatras y clínicos como los del Hospital Sant Joan de Déu, para explorar biomarcadores neonatales basados en patrones de actividad espontánea.

Además, organiza encuentros como el congreso Spont2024, que busca reunir investigadores básicos y clínicos en torno a la actividad cerebral temprana. Juan Lerma recuerda que muchas terapias ya disponibles se apoyan en el conocimiento básico acumulado durante décadas. Y cita a Cajal: «En ciencia, los tiempos son inexorables y no se puede atropellar a la razón». También subraya la necesidad de aumentar la inversión y la colaboración masiva: «Es preciso una legión de investigadores colaborando con un único fin», parafraseando una famosa cita de Cajal («Para producir un Galileo o un Newton es preciso una legión de investigadores estimables»).

Preguntado por el auge de las interfaces cerebro-máquina,

Lerma no oculta su entusiasmo: «Los resultados son espectaculares. Baste recordar las imágenes de una persona tetrapléjica moviendo un brazo robótico sólo con el pensamiento». Sobre la estimulación magnética transcraneal, una técnica no invasiva que permite modular zonas concretas del cerebro, asegura que se ha mostrado eficaz en tratamientos específicos, aunque considera necesario estudiar más para perfeccionarla y hacerla más usable. En su opinión, estas tecnologías abren un campo de futuro tan prometedor como exigente.

«Es preciso una legión de investigadores colaborando con un único fin»

**Juan Lerma**

Comprender cómo surge la mente a partir de conexiones invisibles entre neuronas no es solo una ambición científica: es también una vía para mejorar la salud, anticipar enfermedades, inspirar nuevas tecnologías y avanzar hacia terapias más precisas. Gran parte de este progreso se basa en investigaciones fundamentales como las que lideran Juan Lerma y Guillermina López-Bendito.

«A lo largo de más de treinta años, nuestras investigaciones se han centrado en entender cómo las neuronas se comunican entre sí a nivel molecular y funcional y hemos avanzado mucho», explica Lerma. Estos mecanismos están en la base del aprendizaje cerebral y, hoy, también sirven de

inspiración para dialogar mejor con la inteligencia artificial y diseñar redes de aprendizaje profundo más eficientes».

Del laboratorio a la IA, de los circuitos embrionarios a las herramientas clínicas, la neurociencia demuestra que conocer el cerebro no solo es una empresa intelectual: es una forma de transformar nuestro presente y anticipar un futuro más consciente, saludable y, probablemente, justo.

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### **BLOQUE II**

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### **BLOQUE III**

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### **AYER Y MAÑANA**

#### **EPÍLOGO**

# AYER Y MAÑANA



## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### **BLOQUE II**

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### **BLOQUE III**

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### **AYER Y MAÑANA**

#### **EPÍLOGO**

# Ayer

## ¿Quién sembró la semilla de tu curiosidad hacia la ciencia?

Personas, momentos y palabras de los que brotó el afán por descubrir.

Verónica Bolón

### **Mi propia curiosidad**

hizo que me interesase por resolver problemas. Con cinco años hice mi primer experimento científico. Acababa de nacer mi hermana y le mordí un dedo para saber si los bebés sentían dolor. Mis padres pensaron que eran celos, pero estaba haciendo un experimento.

José Duato

### **La tecnología**

que observaba a mi alrededor desde que tuve uso de razón. Solo pulsando o girando un botón se podía encender una luz, escuchar a alguien (radio), ver imágenes que cambiaban (televisión). Todo eso me fascinó.

Consuelo Martínez

### **Mi padre,**

que era maestro vocacional y entregado, me transmitió el amor y la curiosidad por la ciencia en general y las matemáticas en particular. También tuve un gran profesor de Matemáticas durante el bachillerato que estimuló mi interés.

David Ríos

### **Sixto Ríos,**

mi padre, en una conversación siendo yo adolescente en la sierra madrileña, al comentar que no había un equivalente a Newton en las Ciencias Sociales y mencionar la necesidad de mejorar los procesos de toma de decisiones en condiciones de riesgo.

María Ángeles Gil

### **Mis padres**

y algunos de mis profesores. Mi padre era maestro de escuela con gran afición por las ciencias. Doña Piedad de la Gándara, maestra de la Escuela Aneja a la Normal de Valladolid y el profesor Miguel Martín Díaz en la universidad, que me enseñó la importancia de la intuición bien sustentada por el rigor.

Wenceslao González Manteiga

### **Surgió del azar,**

que hizo que un emigrante y buen estudiante de Ciencias llegara a España y obtuviera motivación por parte de profesores en el bachillerato.

Ignacio Cirac

### **La educación**

que me proporcionaron mis padres y la lectura.

David Pérez García

### **Mis padres,**

mi hermano mayor y mi profesor de Física de bachillerato.

Nazario Martín

### **Mis profesores**

del colegio GREDOS que fueron capaces de motivar mi curiosidad por el entorno y, también, por los laboratorios. Siempre he pensado que el primer ascensor social es el colegio.

María Varela del Arco

### **Mi padre.**

A mis continuas preguntas de niña, tipo «¿Por qué esto es así?», contestaba con paciencia hasta que se cansaba y se daba a la psicología inversa: «¿Y por qué tú te llamas María?». Yo pensaba «Voy a tener que descubrirlo por mi cuenta...», y hasta ahora.

Jon Marcaide

### **Landau y Einstein.**

Comentarios de mi padre al leer cosas de ciencia en los periódicos. Un excelente profesor de Química que utilizaba un libro cuyo primer capítulo era una introducción clara a la física moderna. Y lecturas de libros de divulgación de grandes científicos como Landau y Einstein.

Jesús Martínez Frías

### **Mis padres**

motivaron mi dedicación por la lectura. Los programas/documentales de Carl Sagan ('Cosmos'), Cousteau ('Océanos') y Rodríguez de la Fuente ('El Hombre y la Tierra') me condujeron por la senda de la naturaleza y el universo.

Hermenegildo García

### **Los libros y el estudio.**

El que yo fuese capaz de entender problemas de física y química que han necesitado siglos de estudio para su comprensión me causaba asombro y admiración. Por supuesto, el entorno familiar ayudó a fomentar ese interés.

Inmaculada Ortiz

### **Mi formación**

en el campo de la química, que en el último curso incluía actividades de iniciación a la investigación. Este primer contacto inició un camino que continuó con una estancia internacional, la tesis, estancias postdoctorales, entre otros hitos. Con cada paso, mi curiosidad científica no ha hecho más que crecer.

Miguel Delibes de Castro

### **Surgió en mi infancia,**

en el seno de mi familia, básicamente con mi padre y hermanos. Pero entonces apenas sabía que la ciencia existía. Un profesor de Selectivo de Ciencias en Valladolid, el Dr. José Planas, me hizo ver que lo mío era la investigación dentro de la Biología.

Pedro Jordano

### **Mi padre.**

Salud Deudero

### **Leonardo da Vinci.**

En mi infancia, el interés por la naturaleza, las invenciones y las exploraciones se despertó a través de las lecturas de grandes autores como Julio Verne, Lewis Carroll o Rudyard Kipling y admirando la genialidad de maestros como Leonardo da Vinci.

José Manuel Moreno

### **Mi profesor de Física**

en el instituto de Iola-Scandinavia (WI, USA). Con experimentos muy sencillos, hacía que comprendiésemos algunos fenómenos fundamentales. Enseñar bien no siempre es una cuestión de dinero, sino de imaginación.

Juan Lerma

### **Leí algunos libros**

cuando empezaba mis estudios de Biología y pensé que las enfermedades del cerebro debían ser procesos físicos y bioquímicos estudiables. Decidí que quería dedicar mi vida a esa tarea. Afortunadamente, encontré a personas, como Elio García-Austt y José Rodríguez-Delgado, que posibilitaron mi entrada en ese campo.

Guillermina López-Bendito

### **Mi padre,**

en las salidas al campo de los fines de semana, cuando íbamos a buscar bichos e investigar. Esas experiencias despertaron en mí el deseo de observar, preguntar y entender cómo funciona la naturaleza.

## PRÓLOGO

### MUY HUMANOS

#### BLOQUE I

[Inteligencia artificial](#)

[Ciberseguridad y criptografía](#)

[Optimización de procesos](#)

#### BLOQUE II

[Computación e información cuánticas](#)

[Nanociencia](#)

[Visión del cosmos](#)

[Energía sostenible](#)

#### BLOQUE III

[Sostenibilidad y biodiversidad](#)

[Cambio climático](#)

[Neurociencia y cerebro](#)

### AYER Y MAÑANA

## EPÍLOGO

# Mañana

## Un deseo para la ciencia del futuro.

—  
La ciencia como legado y proyecto infinito.

Verónica Bolón

### «Más mujeres científicas»

Que los científicos y científicas nunca pierdan la curiosidad ni la ilusión por seguir investigando. Y que tengamos más mujeres científicas.

José Duato

### «Que la sociedad y nuestros gobernantes acepten los resultados científicos y actúen en consecuencia»

Consuelo Martínez

### «Frenar un poco»

Frenar un poco, ser más exigentes con la producción científica y primar la calidad sobre la cantidad para no convertir la ciencia en una carrera de velocidad.

David Ríos

### «Que contribuya a construir un mundo más justo, más seguro, más sano y más cómodo»

María Ángeles Gil

### «Que sea reconocida»

Que se admita que sus avances contribuyen al progreso de la sociedad y de la vida. Y que se preste atención no solo a las ciencias que estén de moda, sino a todas las que siempre, sin necesidad de promoción, representan una ayuda indispensable.

Wenceslao González Manteiga

### «Que se invierta en ella»

Que se invierta en ella y que sea buena ciencia. Que el esfuerzo investigador se dirija a mejorar la calidad de vida medioambiental de todos los seres vivos y hacer más democráticos todos los beneficios del desarrollo científico.

Ignacio Cirac

### «Que sea un apoyo»

Que sea el apoyo que necesita la sociedad para ser más justa y avanzar.

David Pérez García

### «El saber»

Que no pierda la inocencia de buscar simplemente el saber.

Nazario Martín

### «Eliminar los vaivenes y atajos»

Que no deje nunca de poner el respeto a la vida y a nuestro planeta en el eje de la investigación. Si, además, es para la ciencia del futuro en nuestro país, añadiría que se financie de modo fluido, eliminando los vaivenes y atajos.

María Varela del Arco

### «Lo que de verdad es relevante»

Que las modas que van y vienen no nos impidan seguir preguntándonos sobre lo que de verdad es relevante.

Jon Marcaide

### «La humanidad»

Que sea una ciencia abierta a todo el mundo y para el bien de la humanidad.

Jesús Martínez Frías

### «Que nunca se renuncie a la ilusión del descubrimiento»

Hermenegildo García

**«Que resuelva los problemas»**

Que resuelva los problemas más acuciantes de la Humanidad como el envejecimiento, calidad de vida, enfermedades, energía abundante, alimentación saludable y suficiente, acceso a la información veraz y respeto a la biodiversidad y medio ambiente.

Inmaculada Ortiz

**«Equidad»**

Que esté al servicio de las personas y el planeta, resolviendo los grandes desafíos sociales y ambientales con responsabilidad y equidad.

Miguel Delibes de Castro

**«Que sea ciencia»**

Que sea ciencia, es decir, una actividad abierta orientada a generar y compartir conocimiento, ayudándonos a entender el mundo y a nosotros mismos.

Pedro Jordano

**«Las bases de la ciencia ya desde la escuela»**

Que sea apreciada su importancia por la sociedad y por los dirigentes políticos, favoreciendo su desarrollo a partir de conocer las bases de la ciencia ya desde la escuela.

Salud Deudero

**«Que sea universal»**

Que sea universal, de libre acceso, al servicio de la sociedad y sin condicionantes geopolíticos. Es esencial que el desarrollo tecnológico se oriente a la conservación de la biodiversidad del sistema Tierra, garantizando así el equilibrio ecológico, la mitigación del cambio climático y la convivencia.

José Manuel Moreno

**«Guiados por la mejor ciencia»**

Que los científicos nos expliquemos mejor para convencer a los ciudadanos de la importancia de gobernarnos guiados por la mejor ciencia.

Juan Lerma

**«Que podamos cuidar mejor de nosotros mismos y del planeta que habitamos»**

Por un lado, que la neurociencia nos conduzca a descifrar los misterios de la mente, la conciencia y la memoria, para así sanar las «enfermedades del alma». Por otra, que el conocimiento científico mejore la empatía, promueva la libertad y la creatividad y haga que podamos cuidar mejor de nosotros mismos y del planeta que habitamos.

Guillermina López-Bendito

**«La pasión por entender lo desconocido»**

Que sea más integradora, colaborativa y comprometida con mejorar la vida de las personas sin perder la pasión por entender lo desconocido.

## **PRÓLOGO**

### **MUY HUMANOS**

#### **BLOQUE I**

Inteligencia artificial

Ciberseguridad y criptografía

Optimización de procesos

#### **BLOQUE II**

Computación e información cuánticas

Nanociencia

Visión del cosmos

Energía sostenible

#### **BLOQUE III**

Sostenibilidad y biodiversidad

Cambio climático

Neurociencia y cerebro

### **AYER Y MAÑANA**

#### **EPÍLOGO**

# ASÍ SE HIZO.

Finales de 2024.

La RAC y Kyndryl se hacen una pregunta:

¿Cómo acercar la ciencia a la vida?

En el camino, surgen otras: ¿Cómo hacerlo accesible? ¿Cómo hacerlo atractivo? ¿Cómo hacerlo relevante? ¿Cómo hacerlo plural?

Para llegar a una respuesta, se tira de investigación, colaboración y ambición.

La travesía empieza con la guía del académico Manuel de León, profesor de investigación del CSIC, fundador y exdirector del Instituto de Ciencias Matemáticas y el primer español miembro del Consejo Directivo de la Unión Matemática Internacional. Lo acompaña José Pedreira, secretario de amigos de la RAC, equipo al que se une el talento y compromiso de Mónica de la Maza, Marketing Leader de Kyndryl y Salomé Valero, directora de Innovación de Kyndryl. A la iniciativa se suman nuevos aliados: el periodista Carlos Ruano y la compañía de contenido verbal LAVIDITA.

Pronto, comienzan las conversaciones con los académicos, la búsqueda de un hilo común. El descubrimiento de que la ciencia es muy humana. Es curiosidad, maravilla, asombro.

Desde casa o desde el laboratorio, por teléfono o videolla-

mada, los científicos arrojan claridad sobre su oficio. Explican con paciencia y entusiasmo, con metáforas que ayudan a comprender. Nos abren las puertas de la sede de la RAC, un templo del progreso humano.

Así, entrevista tras entrevista, nos enseñan que la ciencia está en la vida.

En ese Bizum que funciona gracias a la exploración del cosmos. En esa raqueta de tenis que creó la nanociencia.

En ese tratamiento médico que vive en las plantas acuáticas.

Con método y atención al detalle, las respuestas de los académicos se entrelazan en forma de reportajes divulgativos y claros que nos acercan a la ciencia sin renunciar al rigor.

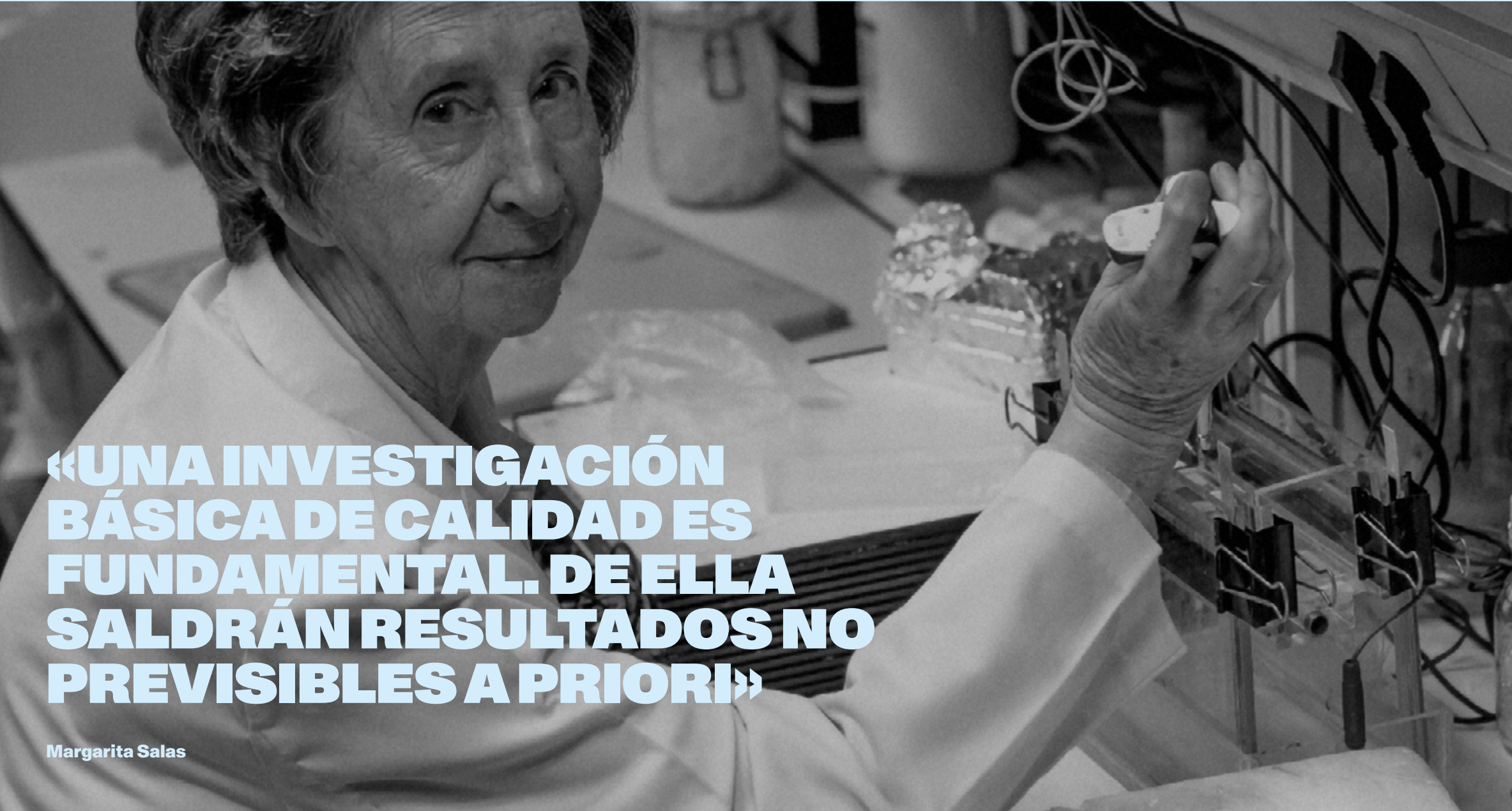
El resultado lo tienes en tus manos.

Aunque este libro acabe aquí, el viaje de la ciencia continúa. En la batería de tu 'smartphone', en la energía que enfría tu casa en verano, en la contraseña de tu banca electrónica.

Sigue mirando.

Mira más de cerca.

La ciencia está ahí.

A black and white photograph of an elderly woman with short, curly hair, wearing a white lab coat. She is looking towards the camera with a slight smile. Her right hand is raised, holding a small, white, cylindrical object. The background is a laboratory setting with various pieces of equipment, including a rack of electronic devices with many cables plugged into it. The lighting is soft, highlighting her face and the texture of her lab coat.

**«UNA INVESTIGACIÓN  
BÁSICA DE CALIDAD ES  
FUNDAMENTAL. DE ELLA  
SALDRÁN RESULTADOS NO  
PREVISIBLES A PRIORI»**

Margarita Salas

**Inteligencia artificial**

Verónica Bolón

Doctora en Informática por la Universidade da Coruña.  
Ingreso en la RAC: 26 de octubre de 2022.

José Duato

Doctor en Ingeniería Industrial por  
la Universitat Politècnica de València.  
Ingreso en la RAC: 13 de noviembre de 2019.

**Ciberseguridad y criptografía**

Consuelo Martínez

Doctora en Matemáticas por  
la Universidad de Zaragoza.  
Ingreso en la RAC: 24 de noviembre de 2021.

David Ríos

Doctor en Ciencias de la Computación por  
la University of Leeds.  
Ingreso en la RAC: 27 de febrero de 2008.

**Optimización de procesos**

Wenceslao González Manteiga

Doctor en Estadística por  
la Universidade de Santiagode Compostela.  
Ingreso en la RAC: 25 de octubre de 2023.

María Ángeles Gil

Doctora en Ciencias Matemáticas por  
la Universidad de Oviedo.  
Ingreso en la RAC: 25 de enero de 2023.

**Computación e información cuánticas**

Ignacio Cirac

Doctor en Física por la Universidad Complutense de Madrid.  
Ingreso en la RAC: 25 de mayo de 2016.

David Pérez García

Doctor en Ciencias Matemáticas por  
la Universidad Complutense de Madrid.  
Ingreso en la RAC: 8 de marzo de 2023.

**Nanociencia**

Nazario Martín

Doctor en Ciencias Químicas por  
la Universidad Complutense de Madrid.  
Ingreso en la RAC: 24 de mayo de 2023.

María Varela del Arco

Doctora en Ciencias Físicas por  
la Universidad Complutense de Madrid.  
Ingreso en la RAC: 22 de mayo de 2024.

**Visión del cosmos**

Jon Marcaide

Doctor en Física por el  
Massachussets Institute of Technology (MIT).  
Ingreso en la RAC: 30 de mayo de 2007.

Jesús Martínez Frías

Doctor en Ciencias Geológicas por  
la Universidad Complutense de Madrid.  
Ingreso en la RAC: 26 de junio de 2024.

**Energía sostenible**

Hermenegildo García

Doctor en Ciencias Químicas por la Universitat de València.  
Ingreso en la RAC: 26 de febrero de 2025.

Inmaculada Ortiz

Doctora en Ciencias Químicas por la Universidad del País Vasco.  
Ingreso en la RAC: 23 de febrero de 2022.

**Sostenibilidad y biodiversidad**

Miguel Delibes de Castro

Doctor en Ciencias Biológicas por  
la Universidad Complutense de Madrid.  
Ingreso en la RAC: 28 de mayo de 2014.

Pedro Jordano

Doctor en Biología Vegetal y Ecología por  
la Universidad de Sevilla.  
Ingreso en la RAC: 30 de octubre de 2024.

**Cambio climático**

Salud Deudero

Doctora en Biología por la Universitat de les Illes Balears.  
Ingreso en la RAC: 25 de septiembre de 2024.

José Manuel Moreno

Doctor en Biología por la  
Universidad Complutense de Madrid.  
Ingreso en la RAC: 22 de mayo de 2024.

**Neurociencia y cerebro**

Juan Lerma

Doctor en Ciencias por la Universidad Autónoma  
de Madrid. Ingreso en la RAC: 26 de marzo de 2025.

Guillermina López-Bendito

Doctora en Neurociencias por el Instituto de  
Neurociencias de Alicante (CSIC-UMH).  
Ingreso en la RAC: 22 de febrero de 2023.



REAL ACADEMIA DE CIENCIAS  
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES  
DE ESPAÑA

---

Con el apoyo de:

kyndryl.

---

Con la colaboración de:



© [2025] Kyndryl España, S.A. y Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España (RAC). Todos los derechos reservados.

El presente documento está actualizado a la fecha de su publicación, y Kyndryl y/o RAC podrán modificarlo en cualquier momento sin previo aviso.

#### Descargo de responsabilidad

Las opiniones, puntos de vista y declaraciones expresadas por los científicos y expertos citados en esta obra pertenecen exclusivamente a sus autores y no reflejan necesariamente la posición oficial de Kyndryl, la RAC ni los editores del libro. La inclusión de estas opiniones tiene como fin fomentar el diálogo y la divulgación del conocimiento científico, sin que ello implique una adhesión institucional a las mismas.

Kyndryl, la RAC y los editores han realizado esfuerzos razonables para asegurar la exactitud de la información incluida, pero no se responsabilizan por errores, omisiones o interpretaciones derivadas del contenido presentado por terceros.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación, así como su distribución, comunicación pública o transformación, por cualquier medio y en cualquier formato, sin la autorización previa, expresa y por escrito de los titulares de los derechos, Kyndryl y la RAC. En caso de citar o compartir fragmentos del contenido, deberá hacerse siempre con la referencia adecuada a la fuente original.

Edición no venal.

---

#### Colaboradores:

Carlos Ruano  
LAVIDITA  
WellDone  
Bernardo Echeverri  
Marc González Sala (Ilustraciones)

